

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN ALTERNADOR DIDACTICO

TOMO I

JOSE DORANCE CORREA RIOS

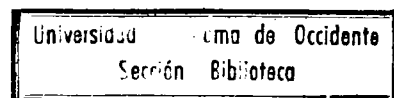
JAIME ALBERTO PINCAY GORDILLO

CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DE OCCIDENTE

DIVISION DE INGENIERIAS

PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRICA

CALI, 1987



C.U.A.O.  
BIBLIOTECA



\*0017981\*

9772

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN ALTERNADOR DIDACTICO

TOMO I

JOSE DORANCE CORREA RIOS

JAIME ALBERTO PINCAY GORDILLO

Trabajo de grado presentado como  
requisito parcial para optar al título  
de Ingeniero Electricista.

Director: DIDIER NAVARRO N. I.E.

Asesora: MARTHA CECILIA AMAYA I.E.

CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DE OCCIDENTE

DIVISION DE INGENIERIAS

PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRICA

CALI, 1987

T  
621.3133  
0824d  
V.1  
e.1

Aprobado por el Comité de Trabajo de  
Grado en cumplimiento de los requisitos  
exigidos por la Corporación Universita-  
ria Autónoma de Occidente para optar al  
título de Ingeniero Electricista.

DIDIER NAVARRO N., I.E.  
Director

MARTHA CECILIA AMAYA, I.E.  
Asesora

FREYDER POSSO, I.E.  
Jurado

Cali, Noviembre      de 1987

## DEDICATORIA

A mi hijo JAIME EDUARDO por su ternura y cariño, me impulsó a continuar para poder culminar con éxito.

A mi madre CILIA, por su interés, preocupación y constante apoyo que me demostró en vida para que saliera adelante.

A mi padre LUIS EDUARDO por ser mi fundamento.

A mis hermanos NESTOR ARTURO, OSCAR EDUARDO y CILIA MARGARITA por esa gran fé que siempre me demostraron.

JAIME ALBERTO



A mi padre MANUEL VICTOR. El ha sido en cada momento mi fuente de inspiración y el motor de mis pensamientos.

A mi hija LORENA. Con su cariño y ternura me impulsó a continuar en busca del éxito..

JOSE DORANCE

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos:

A DIDIER NAVARRO N., I.E., Profesor de la Universidad Autónoma de Occidente y Director del trabajo.

A MARTHA CECILIA AMAYA, I.E. Profesora vinculada a la Universidad Autónoma de Occidente, Asesora principal del proyecto.

A EDGAR GARCIA, I.E. Jefe de Laboratorios de la Universidad Autónoma de Occidente.

A DIEGO FERNANDO POLO, Técnico del Laboratorio de Conversión de Energía.

A JAIRO PALACIOS, I.E., Profesor de tiempo completo de la Universidad del Valle en el área de máquinas eléctricas.

A JOSE ARMANDO PALACIOS, Técnico Mecánico quien construyó la máquina.

A MARGARITA FRANCO, secretaria mecanógrafa del trabajo.

## TABLA DE CONTENIDO

### TOMO I

	Pág
INTRODUCCION .....	1
1 NOCIONES GENERALES SOBRE LAS MAQUINAS DE CORRIENTE ALTERNA .....	3
1.1 GENERALIDADES .....	3
1.2 CLASIFICACION GENERAL DE LAS MAQUI - NAS ELECTRICAS .....	4
1.2.1 Generadores .....	6
1.2.2 Motores .....	7
1.2.3 Transformadores .....	7
1.3 CLASIFICACION DE LAS MAQUINAS DE CO - RRIENTE ALTERNA .....	8
1.3.1 Máquinas sincrónicas .....	9
1.3.2 Máquinas asincrónicas .....	10
1.3.2.1 Clasificación de las máquinas sincrónicas	11
1.3.2.1.1 Según la constitución de su sistema indu- cido .....	11

1.3.2.1.2	Según el número de fases .....	12
1.3.2.1.3	Según la forma constructiva del inductor móvil .....	12
2	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS GENERADORES DE CORRIENTE ALTERNA .....	18 ✓
2.1	GENERALIDADES .....	18
2.2	DEFINICION DE CORRIENTE ALTERNA .....	19
2.3	FUERZA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA EN UN CONDUCTOR .....	22
2.4	CIRCUITO MAGNETICO .....	26
2.5	GENERACION DE UNA CORRIENTE ALTERNA MONOFASICA .....	29
2.6	GENERACION TRIFASICA .....	33
2.6.1	Ventajas de la generación trifásica .....	33
2.6.2	Principio de generación de una f.e.m. trifásica .....	34
2.7	CAMPOS MAGNETICOS CIRATORIOS .....	37
2.8	REACCION DE ARMADURA EN LAS MAQUINAS SINCRONICAS TRIFASICAS .....	40
2.9	CARACTERISTICAS ANGULARES DE UNA MAQUINA SINCRONICA .....	40

2.10	MOMENTO ELECTROMAGNETICO .....	46
3	MATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCION DE MAQUINAS .....	48
3.1	INTRODUCCION .....	48
3.2	MATERIALES ESTRUCTURALES .....	49
3.3	MATERIALES ACTIVOS .....	50
3.3.1	Materiales conductores .....	50
3.3.2	Materiales magnéticos .....	51
3.4	MATERIALES AISLANTES .....	53
4	PARAMETROS PARA LA SELECCION DE MATERIA- LES EN EL DISEÑO DE MAQUINAS ELECTRICAS ...	57
4.1	CAMPO MAGNETICO .....	57
4.2	FUERZA MAGNETOMOTRIZ .....	58
4.3	INTENSIDAD DEL CAMPO MAGNETICO .....	58
4.4	FLUJO MAGNETICO .....	60
4.5	INDUCCION MAGNETICA .....	60
4.6	PERMEABILIDAD MAGNETICA .....	62

4.7	PERMEANCIA .....	63
4.8	RELUCTANCIA .....	64
4.9	SATURACION .....	65
4.10	HISTERESIS Y RETENTIVIDAD .....	66
4.11	REMANENCIA .....	68
4.12	RETENTIVIDAD .....	68
4.13	DENSIDAD DE FLUJO RESIDUAL .....	68
4.14	FUERZA COERCITIVA .....	69
4.15	PERDIDA DE ENERGIA EN LOS NUCLEOS FERROMAGNETICOS .....	69
4.15.1	Pérdidas de histéresis .....	70
4.15.1.1	Fórmula de Steinmetz para pérdidas de histéresis .....	74
4.15.2	Pérdidas por corrientes parásitas .....	76
4.15.2.1	Cálculo de las pérdidas debidas a las corrientes parásitas .....	76
4.15.3	Pérdidas en el núcleo .....	77
5	PARAMETROS DE DISEÑO DEL ALTERNADOR DIDACTICO .....	78
5.1	INTRODUCCION .....	78

5.2	PARAMETROS FUNDAMENTALES .....	79
5.3	DATOS PRINCIPALES DEL ALTERNADOR DIDACTICO .....	80
5.4	CALCULOS .....	80
5.5	VELOCIDAD DE EMBALAMIENTO .....	82
5.6	AISLAMIENTO .....	82
5.7	VENTILACION .....	82
6	CALCULO DEL ESTATOR .....	84
6.1	VALORES PROVISIONALES .....	84
6.2	RECUBRIMIENTO POLAR ' ' '.....	88
6.3	FACTOR DE BOBINADO .....	88
6.4	ARROLLAMIENTO INDUCIDO .....	92
6.5	FEM DE UNA MAQUINA DE CORRIENTE ALTERNA ..	92
6.6	NUMERO DE RANURAS POR POLO Y POR FASE ..	97
6.7	INDUCCION EN EL ENTREHIERRO EN VACIO ..	97
6.8	DIMENSIONES DE CONDUCTORES Y POLOS ESTATORICOS .....	100

6.8.1	Conductores .....	100
6.8.2	Polos estatóricos .....	103
6.8.3	Cálculo de resistencia óhmica .....	106
6.8.4	Altura del diente o núcleo estatórico "ht" ....	108
6.9	CALCULO DEL YUGO .....	110
7	CALCULOS DEL ROTOR .....	113
7.1	NUCLEO .....	113
7.1.1	Coeficiente de dispersión polar .....	113
7.1.2	Factor de apilamiento .....	114
7.1.3	Longitud del núcleo polar .....	114
7.1.4	Ancho del núcleo polar .....	115
7.2	CALCULO DE LA CONFIGURACION COSENOIDAL EN EL ENTREHIERRO .....	116
7.2.1	Valores del entrehierro .....	116
7.3	BOBINAS POLARES .....	120
7.3.1	Cálculo de la altura de la bobina polar (provi- sional ) .....	120
7.3.2	Altura radial del núcleo polar .....	120
7.3.3	Definición de la corona polar .....	121
7.4	DIMENSIONES COMPLEMENTARIAS .....	123



8	EXCITACION EN VACIO .....	125
8.1	ENTREHIERRO .....	125
8.2	DIENTES ' ' ' .....	128
8.3	YUGO .....	131
8.4	PERMEANCIA DE DISPERSION POLAR EN EL ROTOR .....	133
8.4.1	Permeancia zona axial entre expansiones polares ( Zona 1 ) .....	137
8.4.2	Permeancia zona frontal ( Zona 2 ) .....	137
8.4.3	Permeancia entre caras longitudinales ( Zona 3 ) .....	138
8.4.4	Permeancia entre caras frontales del núcleo polar ( Zona 4 ) .....	138
8.5	POLOS .....	139
8.6	NUCLEO DEL ROTOR ( CUBO ) .....	142
8.7	EXCITACION EN VACIO .....	143
9	EXCITACION A PLENA CARGA Y $\cos \phi$ NORMAL	145
9.1	OBTENCION DE COEFICIENTES "C <sub>1</sub> " Y "C <sub>t</sub> " PARA POLOS SALIENTES .....	146
9.2	REACTANCIA DE DISPERSION .....	148

9.2.1	Ancho de las ranuras .....	149
9.2.2	Alturas de las ranuras .....	150
9.2.3	Corrección para la altura de los conductores y resto de ranura .....	151
9.2.4	Corrección por concentración de corriente ...	153
9.2.5	Permeancia específica de ranura .....	157
9.2.6	Permeancia específica de las cabezas de dientes t .....	157
9.2.7	Permeancia específica total de dispersión x	158
9.2.8	Permeancia equivalente por ranura x .....	159
9.3	DETERMINACION DEL DIAGRAMA FASORIAL .	162
9.3.1	FEM a inducir por el flujo resultante .....	164
9.4	EXCITACION EN CARGA .....	168
9.4.1	Entrehierro .....	168
9.4.2	Flujo en el entrehierro .....	169
9.4.3	Dientes .....	170
9.4.4	Yugo .....	171
9.4.5	Inductor .....	172
9.4.6	Núcleo del rotor ( cubo ) .....	174
9.5	CARACTERISTICA MAGNETICA DE LA MAQUINA	176
9.5.1	Características magnéticas del alternador didác- tico en vacío y en carga .....	176

9.6	BOBINAS POLARES .....	181
9.6.1	Selección del conductor .....	181
9.6.2	Cálculo de la bobina .....	182
9.6.3	Cálculo de resistencia óhmica .....	184
9.6.4	Pérdidas y calentamiento de las bobinas inductoras .....	187
9.7	DEFINICION DE ALTURA RADIAL TOTAL DE POLO .....	188
9.7.1	Altura radial del núcleo polar .....	188
10	CONSTRUCCION DEL ALTERNADOR DIDACTICO	190
10.1	ESTATOR .....	190
10.1.1	Corona .....	190
10.1.2	Polos .....	191
10.1.2.1	Núcleo .....	191
10.1.2.2	Bobinados .....	194
10.2	ROTOR .....	197
10.2.1	Núcleo .....	197
10.2.1.1	Cuerpo .....	197
10.2.1.2	Núcleos rotóricos .....	197
10.2.1.3	Zapatas polares .....	198

10.2.2 Bobinados .....	201
10.3 EJE .....	203
10.4 DISPOSICION DE ACOPLE .....	203
10.5 ANILLOS ROZANTES .....	204
10.6 ESCOBILLAS .....	206
10.7 RODAMIENTOS .....	207
10.8 MAQUINA MOTRIZ .....	208
10.9 EXCITATRIZ .....	209
10.10 BASE GENERAL O PEDESTAL .....	210
11 CONCLUSIONES .....	
GLOSARIO .....	
BIBLIOGRAFIA .....	

## LISTA DE FIGURAS

		Pág.
FIGURA 1	Sistema inductor de polos salientes ...	15
FIGURA 2	Variación de la corriente alterna .....	20
FIGURA 3	F.e.m. inducida en un conductor .....	23
FIGURA 4	F.e.m. de un conductor .....	25
FIGURA 5	Distribución de la inducción en el entrehierro de un paso polar .....	26
FIGURA 6	Distribución de la inducción debajo del polo: a) descomposición de la curva de inducción en armónicos; b y c) modelos de rotores que crean el tercero y el quinto armónicos de inducción .....	27
FIGURA 7	Forma esquemática de los circuitos magnéticos de máquinas eléctricas .....	28
FIGURA 8	Espira en la que se induce una f.e.m. sinusoidal .....	30
FIGURA 9	Sinusoide de la f.e.m. inducida .....	30
FIGURA 10	Dos períodos por revolución en un alternador de cuatro polos .....	31
FIGURA 11	Generación de tensiones y corrientes trifásicas .....	35
FIGURA 12	Esquema de devanado trifásico de dos polos en el estator .....	38

FIGURA 13	Corrientes trifásicas instantáneas ....	39
FIGURA 14	Diagrama de tensiones de un alternador sincrónico de polos salientes .....	43
FIGURA 15	Curva B versus H .....	65
FIGURA 16	Efecto de histéresis de un material ferro- magnético .....	67
FIGURA 17	Anillo de histéresis de un material ferro- magnético .....	70
FIGURA 18	Pérdida de histéresis por ciclo de magne- tización de un material ferromagnético .	73
FIGURA 19	Relación $\frac{L}{T}$ para alternadores de po- los salientes .....	85
FIGURA 20	Paso polar T en función de la potencia a- parente por par de polos $P_a/p$ .....	86
FIGURA 21	F.e.m. de una espira de paso $Y_n$ $T_{\phi}$ .	89
FIGURA 22	Factor relativo de forma $K_f$ para diversos tipos de sistemas polares .....	96
FIGURA 23	Dimensiones de las bobinas estatóricas .	107
FIGURA 24	Dimensiones de un polo estatórico ....	109
FIGURA 25	Entrehierro cosenoidal .....	117
FIGURA 26	Entrehierro uniforme de 1.0 mm .....	119
FIGURA 27	Dimensiones de un polo rotórico .....	124
FIGURA 28	Factor relativo de amplitud para máqui- nas de corriente alterna .....	126
FIGURA 29	Ejemplo de una curva con varios factores $K_t$ para el cálculo del campo en los dientes	130
FIGURA 30	Característica magnética del acero fundi- do utilizado en la construcción del alterna	

	dor didáctico 0.25% de carbono y 0.20% de silicio .....	132
FIGURA 31	Dimensiones definitivas del polo .....	134
FIGURA 32	Localización de los arcos medios .....	136
FIGURA 33	Zonas donde se presenta dispersión polar .....	137
FIGURA 34	Forma de la ranura .....	150
FIGURA 35	Alturas de las ranuras .....	151
FIGURA 36	Factores de corrección $K_c$ para la permeancia del cuerpo de las bobinas en la ranura y $K_a$ para la permeancia del espacio exterior a las bobinas .....	152
FIGURA 37	Factor de corrección $K_\lambda$ para la permeancia de dispersión en el cuerpo del bobinado dentro de la ranura en función de la altura aparente de conducción ( $\sqrt{2}$ ) .....	154
FIGURA 38	Diagrama vectorial del alternador didáctico en valores relativos ( $U_f=100\%$ ) ...	167
FIGURA 39	Característica de la máquina en vacío y en carga .....	180
FIGURA 40	Dimensiones de las bobinas polares ..	185
FIGURA 41	Forma del estator .....	192
FIGURA 42	Forma de la corona estatórica .....	193
FIGURA 43	Forma de los polos estatóricos .....	194
FIGURA 44	Forma y dimensiones de los polos estatóricos .....	195
FIGURA 45	Forma de una bobina estatórica .....	196
FIGURA 46	Formas y dimensiones de las bobinas estatóricas .....	196

FIGURA 47	Cuerpo del rotor .....	198
FIGURA 48	Forma del cuerpo del rotor .....	199
FIGURA 49	Núcleos rotóricos sin zapata polar y con zapata polar .....	200
FIGURA 50	Zapatas polares .....	200
FIGURA 51	Forma y dimensiones de los polos rotó - ricos .....	201
FIGURA 51	Forma de la bobina rotórica .....	202
FIGURA 53	Forma del eje .....	203
FIGURA 54	Forma del dispositivo de acople .....	204
FIGURA 55	Forma de los anillos rozantes .....	205
FIGURA 56	Forma de las escobillas .....	206
FIGURA 57	Fotografía de los rodamientos utilizados	207
FIGURA 58	Máquina motriz .....	210
FIGURA 59	Conexiones internas del motor .....	211
FIGURA 60	Excitatriz .....	212
FIGURA 61	Base del alternador didáctico .....	212



## LISTA DE TABLAS

		Pág.
TABLA 1	Relación entre la velocidad, número de polos y la frecuencia en una máquina .....	32
TABLA 2	Temperaturas de referencia usadas en la <u>d</u> e terminación de pérdidas $I^2 \times R$ .....	55
TABLA 3	Cálculo del entrehierro cosenoidal .....	118
TABLA 4	Características magnéticas del alternador didáctico en vacío y en carga .....	177

## RESUMEN

El presente trabajo se ha desarrollado en dos tomos, los cuales se encuentran relacionados en una forma lógica y pedagógica.

El primer tomo consta de diez capítulos distribuidos de la siguiente forma: En el capítulo primero se dan unas nociones generales sobre las máquinas eléctricas de corriente alterna y su clasificación haciendo énfasis en las máquinas sincrónicas. En el segundo capítulo se describe el principio de funcionamiento de los generadores de corriente alterna; aquí se analiza la forma de obtener una fuerza electromotriz inducida monofásica y trifásica. En el capítulo tercero tratamos el tema de los materiales utilizados en la construcción de máquinas eléctricas y su clasificación dependiendo de la función que cumple en dicha máquina. En el capítulo cuarto se definen los factores que intervienen en la selección de los materiales empleados en la construcción de máquinas eléctricas, prestando mayor interés en las curvas de magnetización y su ciclo de histéresis. En el capítulo quinto se determinan los parámetros de diseño del alternador didáctico; estos pará-

metros son básicamente la potencia aparente en bornes, el factor de potencia normal, la tensión de línea, el número de fases, la frecuencia y la velocidad de giro. En el capítulo sexto se realiza un diseño teórico de los elementos constitutivos del estator para el alternador didáctico. Estos elementos son: carcasa, núcleos estatoricos y devanado del inducido. En el capítulo séptimo, al igual que en el sexto, se realiza un diseño teórico de los elementos que constituyen el rotor como son los núcleos rotóricos, zapatas polares, devanado inductor y el circuito de excitación. En los capítulos octavo y noveno se analiza el comportamiento del alternador didáctico en vacío y en carga respectivamente, verificando así los valores adoptados en el diseño del estator y del rotor. En el capítulo décimo se expone la forma, dimensiones y materiales que se utilizaron en la construcción del alternador didáctico, ilustrado con fotografías.

El segundo tomo es un manual de laboratorio que describe las diferentes prácticas que se pueden realizar con el alternador didáctico, tales como:

- Elementos básicos de un alternador.
- Principios básicos de electromagnetismo. Principio generador.
- Puesta en marcha del alternador didáctico.
- Efectos de la variación de velocidad sobre la frecuencia de gene-

ración.

- Efectos de la frecuencia variando el número de polos.
- Efectos de la variación de carga en la tensión generada.
- Generadores trifásicos.
- Conexión trifásica en estrella o Y del alternador didáctico.
- Conexión trifásica en triángulo o Delta del alternador didáctico.
- Ensayo en vacío y en corto circuito.

## INTRODUCCION

Es indudable que el desarrollo industrial de un país marcha de acuerdo a su desarrollo energético y éste a su vez refleja el nivel económico y social de la nación. Por lo tanto podemos medir su avance tecnológico en términos de consumo de energía eléctrica y son bien recibidos todos los aportes que en materia tecnológica o científica se hagan al campo de la electricidad.

El presente trabajo ha sido diseñado como complemento o material de apoyo para el laboratorio de conversión de energía y pretende ser autoformativo, permitiendo al estudiante un avance de acuerdo a su propio interés, necesidad y capacidad.

En consecuencia de lo anterior, el material se presenta en forma secuencial, abundante en gráficas y con vocabulario sencillo y claro. Esto hace el material recomendable a profesores, estudiantes y también para su empleo en otros planteles universitarios, talleres y como consulta general.

A todo esto se agrega el objetivo de elaborar una máquina didáctica y modular, cuyas piezas sean de rápido desarme y sin embargo no pierda firmeza.

Debido a la complejidad en la determinación de algunos parámetros, se hace necesario tomarlos de gráficos que se han elaborado, tomando el promedio de máquinas ya construidas y que han presentado un buen funcionamiento. En otros casos trabajaremos tomando valores sugeridos por diferentes autores a partir de los cuales determinaremos los valores con los que hemos de trabajar.

El Tomo II hace referencia a un manual de laboratorio que mediante la orientación y supervisión del instructor se pretende que el estudiante aplique y refuerce los conocimientos adquiridos.

En síntesis, nos interesa abrir perspectivas y llevar la atención para que el diseño y construcción de máquinas eléctricas no sea un sueño olvidado sino una realidad.

## 1. NOCIONES GENERALES SOBRE LAS MAQUINAS

### DE CORRIENTE ALTERNA

#### 1.1 GENERALIDADES

Dada la importancia que actualmente tiene la energía eléctrica, se indican a continuación las características de las máquinas y aparatos necesarios para su producción y utilización.

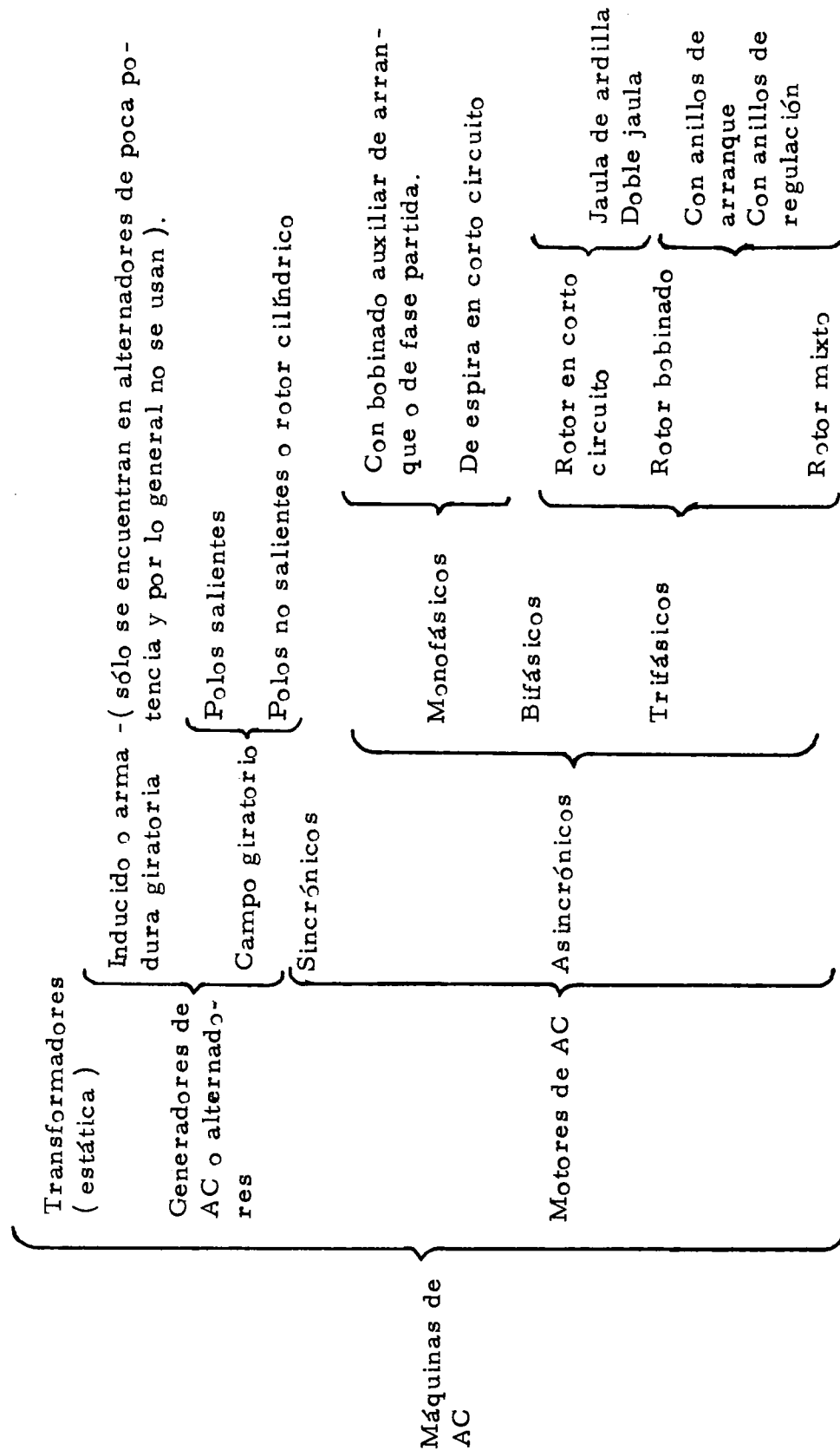
Se entiende por máquina eléctrica el conjunto de mecanismos que puedan producir, transformar o aprovechar la energía eléctrica.

( 1 ).

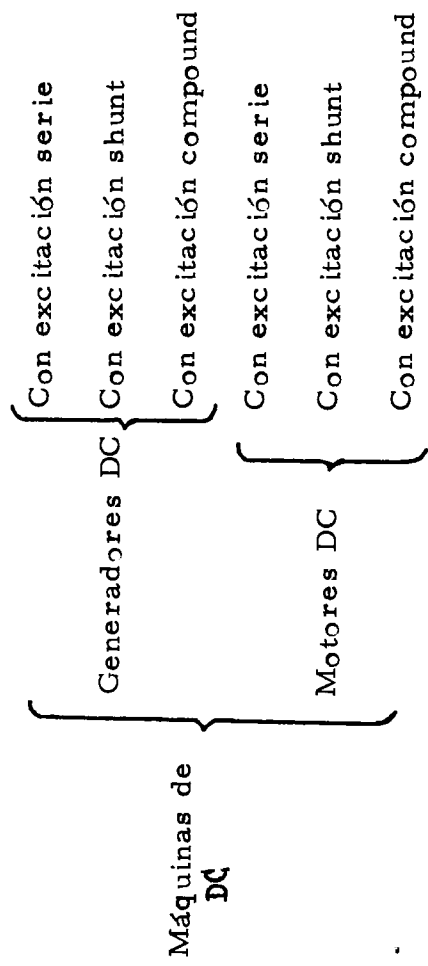
---

( 1 ) ICONTEC. Norma 320. Definiciones. Motores y generadores.  
p. 1.

## 1.2 CLASIFICACION GENERAL DE LAS MAQUINAS ELECTRICAS







Las máquinas eléctricas se clasifican en dos grupos principalmen -  
te:

- Máquinas rotativas:

- + Generadores

- + Motores

- Máquina estática:

- + Transformadores

#### 1.2.1 Generadores

Son máquinas que producen energía eléctrica por transformación de la energía mecánica ( 2 ). A su vez, los generadores se clasifican en dinamos y alternadores, según produzcan corriente continua y alterna respectivamente.

Existe otro tipo de generadores ( no son máquinas ) que transfor -  
man la energía química en eléctrica, como son las pilas y acumula  
dores.

---

( 2 ) Ibid., pp.4 - 5

En la época actual se buscan otras fuentes de energía, por ejemplo la pila solar que transforma la energía térmica del sol en eléctrica.

### 1.2.2 Motores

Son máquinas que producen energía mecánica por transformación de la energía eléctrica ( 3 )

Los motores de corriente continua pueden ser de cuatro tipos: independiente, derivación, serie y compuestos. Los motores de corriente alterna se clasifican en sincrónicos y asincrónicos.

Existe un tipo de motores llamados universales que pueden funcionar indistintamente con corriente continua o alterna.

### 1.2.3 Transformadores

Son máquinas eléctricas estáticas de inducción electromagnética

---

( 3 ) Ibid., pp. 4 - 5

destinados a transformar sistemas de corrientes variables, de intensidad y de tensión generalmente diferentes y de la misma frecuencia. ( 4 )

A su vez los transformadores se subdividen en transformadores de potencia, transformadores de distribución y transformadores de medida.

El autotransformador es un transformador en el que los devanados primario y secundario tienen partes comunes ( 5 ).

En el Cuadro 1 se observa la clasificación de las máquinas eléctricas.

### 1.3 CLASIFICACION DE LAS MAQUINAS DE CORRIENTE ALTERNA

Las máquinas de corriente alterna se dividen en dos grupos: máquinas sincrónicas y máquinas asincrónicas.

---

( 4 ) Ibid., pp 4 - 5

( 5 ) Ibid., pp 4 - 5

### 1.3.1 Máquinas sincrónicas

Máquina en la cual el rotor gira a las mismas revoluciones que el campo magnético ( 6 ) es decir, son las que giran a una velocidad constante que depende de la frecuencia de la red y del número de polos de la máquina.

$$N = \frac{60 \times f}{P} \quad ( 7 )$$

donde:

N = velocidad de rotación o sincronismo en RPM

f = frecuencia en Hz

P = número de pares de polos

La máquina sincrónica se excita con la corriente continua aplicada a su devanado de excitación desde una red de corriente continua o desde una máquina especial de corriente continua llamada excitatriz. Las máquinas sincrónicas de pequeña potencia pueden tener imanes permanentes o están constituidos como una máquina sincrónica de reacción sin devanado especial de excitación.

---

( 6 ) Ibid., pp.2-6

( 7 ) RAMIREZ V., José. Máquinas de corriente alterna. Enciclopedia CEAC de Electricidad. p.233

Este tipo de máquina se utiliza principalmente como generador para producir energía eléctrica de corriente alterna, pero también se puede usar como compensador sincrónico que en esencia es un motor sincrónico trabajando en vacío para mejorar el factor potencia.

### 1.3.2 Máquinas asincrónicas

Máquina en la cual el rotor gira a diferentes revoluciones que el campo magnético ( 8 ).

En este tipo de máquinas el inducido no alcanza nunca la velocidad del inductor, ya que si no hubiera movimiento relativo entre ambos, en el inducido no se crearían corrientes y por lo tanto desaparecería el par de rotación.

Entre inductor e inducido existe en todo momento una diferencia de velocidad; esta diferencia de velocidad es llamada deslizamiento, por esta razón estas máquinas se denominan asincrónicas a di

---

( 8 ) Norma Contec, op. cit. p.2

ferencia de las sincrónicas en que la velocidad es la misma.

En la máquina asincrónica el campo magnético lo crea la corriente alterna aplicada a la misma desde cualquier fuente de corriente alterna.

Las máquinas de este tipo se utilizan principalmente como motores, lo contrario de las sincrónicas.

#### 1.3.2.1 Clasificación de las máquinas sincrónicas

Pueden hacerse varias clasificaciones, según el punto de vista que se tome para establecerlas.

##### 1.3.2.1.1 Según la constitución de su sistema inducido

- De inducido fijo: Que prácticamente es el tipo más importante y al que nos ceñimos para el diseño y la construcción del alternador didáctico en el presente proyecto.

- De inducido móvil: Utilizadas exclusivamente en máquinas de potencia fraccionada y conmutatrices.

#### 1.3.2.1.2 Según el número de fases

- Monofásicas
- Polifásicas ( por lo general de tres fases ). ( 9 )

#### 1.3.2.1.3 Según la forma constructiva del inductor móvil

La gran experiencia obtenida en la construcción y el servicio de las máquinas sincrónicas ha demostrado que el sistema más económico y conveniente de construcción es cuando los polos excitados por corriente continua están instalados en la parte giratoria de la máquina, llamada rotor y el devanado de inducido de corriente alterna está colocado en la parte inmóvil de la misma llamada estator.

Uno u otro tipo de construcción de la máquina sincrónica está ligado, generalmente, con la velocidad de rotación  $N$  de la misma.

Las máquinas de mayor velocidad de rotación para una frecuencia

---

( 9 ) RAMIREZ V., José, op. cit. pp 233 - 247



dada, son las que tienen un número de pares de polos igual a  $P = 1$  y  $P = 2$ ; en el primer caso, para  $f = 60$  Hz tenemos que:  $N = 3.600$  r.p.m. y en el segundo caso  $N = 1.800$  r.p.m. En estas máquinas de gran potencia la velocidad del rotor es tan grande que por razones ligadas a la resistencia mecánica del rotor y la mejor disposición y fijación del devanado de excitación, es aconsejable construir la máquina con polos interiores o lisos.

Pero cuando el número de pares de polos es mayor o igual a tres ( $P \geq 3$ ), la velocidad del rotor disminuye y entonces las máquinas sincrónicas se construyen generalmente con polos salientes. ( 10 ).

Según la forma constructiva del inductor móvil, las máquinas sincrónicas se dividen en:

- Máquinas de polos salientes: El rotor de polos salientes tiene en general la forma de un volante o rueda, cuya llanta constituye la culata del inductor ( Véase Figura 1 ); a ella se unen fijándolos sólidamente, los núcleos polares y a estos las zapatas polares.

---

( 10 ) Ibid., pp. 233 - 247

A diferencia de las máquinas asincrónicas, el rotor de las sincrónicas no es necesario construirlo todo en chapas, puesto que el campo que crea la corriente de excitación es casi constante y por lo tanto es despreciable el valor de las corrientes parásitas inducidas ( 11 ).

En los alternadores de pequeña potencia y poco diámetro es posible hacer la rueda polar y los polos de una sola pieza, pero en los de media y gran potencia hay necesidad de construirlos por separado y si el diámetro es grande, también es preciso construir el volante de dos o más piezas.

Hay que considerar el centrado exacto de la rueda polar con relación al inducido, puesto que los esfuerzos que se desarrollan entre el inducido y los polos son grandes; cuando el centrado es perfecto y por tanto iguales los entrehierros bajo cada polo, estos esfuerzos se equilibran en las direcciones radiales; pero si dichos entrehierros son diferentes, el esfuerzo hacia los polos en que la longitud del entrehierro es menor, adquiere un valor mucho más

---

( 11 ) Ibid., pp. 243 - 246

considerable que en el lado opuesto, no solo porque las atracciones magnéticas para masas iguales están en razón inversa del cuadrado de la distancia, sino también porque las inducciones son mayores donde el entrehierro es menor al ser más pequeña la reluctancia de los circuitos magnéticos correspondientes.

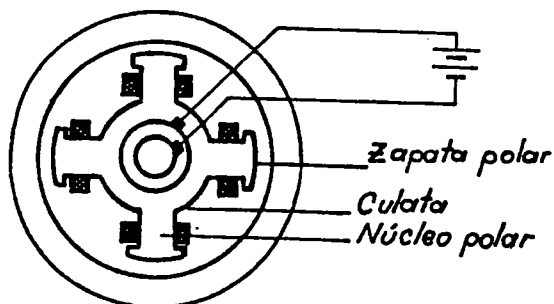


FIGURA 1. Sistema inductor de polos salientes

Una desigualdad del entrehierro dá lugar a esfuerzos resultantes en sentido radial que obran por flexión sobre el eje y tienden a deformar el inducido. Por esta razón en las máquinas grandes sólo se admite una tolerancia de 0.05 mm en el centrado del eje ( 12 )

- Máquinas de polos interiores o lisos: Su empleo es obligado

---

( 12 ) Ibid., pp.243 - 246

en la construcción de turbogeneradores puesto que la enorme velocidad angular que se alcanza impide una buena sujeción de los polos salientes.

Las fuerzas centrífugas desarrolladas a altas velocidades crean en determinadas partes del rotor tensiones mecánicas bastante grandes. A causa de esto, en las máquinas de polos lisos (generalmente turbogeneradores), el rotor representa una pieza maciza de acero forjado de alta resistencia mecánica conseguida como resultado de un complicado tratamiento térmico y mecánico al que se le somete.

Por toda la longitud del rotor se taladra en dirección axial un agujero central que sirve en primer lugar para analizar en la zona central el material de la pieza forjada, y en segundo lugar, para descargar la pieza forjada de las tensiones interiores peligrosas.

Las espiras de las bobinas inductoras se alojan en ranuras semejantes a las de los inducidos. Para evitar que la fuerza centrífuga provoque una deformación de las cabezas de las bobinas inductoras, se hace necesario sujetar fuertemente las porciones de los conductores no introducidos en las ranuras. Esto se consigue mediante casquillos de acero colocados de modo que envuelvan las referidas

cabezas y quedan sólidamente fijos al cilindro del rotor. ( 13 )

---

( 13 ) Ibid., pp. 243 - 246

## 2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS GENERADORES DE CORRIENTE ALTERNA

### 2.1 GENERALIDADES

El principio de funcionamiento fundamental de un generador de corriente alterna es el mismo que el de una máquina de corriente continua, pero con la diferencia de que en la corriente alterna no hace falta rectificar la f.e.m. variable en el tiempo, e inducida en el devanado del inducido, en otra de dirección constante. Por eso la máquina generadora de corriente alterna no necesita colector.

Un generador de corriente alterna consta principalmente de un circuito magnético, un devanado inductor excitado con corriente continua, un devanado inducido de corriente alterna y una estructura mecánica en la que se incluyen los sistemas de refrigeración y lubricación.

La experiencia obtenida en la construcción y en el servicio de las máquinas generadoras de corriente alterna ha demostrado que el sistema más económico y conveniente es disponer el inductor móvil ( rotor ) y el inducido fijo ( estator ).

## 2.2 DEFINICION DE CORRIENTE ALTERNA

Es una corriente de electrones que se mueve primero en una dirección durante un período determinado de tiempo y luego en dirección opuesta por un período de tiempo igual. O sea que cambia constantemente de dirección y de intensidad.

En la Figura 2 se muestra cómo aumenta la corriente alterna desde cero hasta un valor máximo en dirección positiva y cómo vuelve después a cero nuevamente; también se muestra cómo se aumenta hasta el valor máximo en dirección opuesta o negativa y cómo vuelve otra vez a cero.

Esta es la razón por la cual se dice que la corriente alterna cambia constantemente de intensidad y dirección, periódicamente.

Por otra parte, las características de la corriente alterna fueron comprendidas claramente a fines del siglo pasado y por lo tanto su

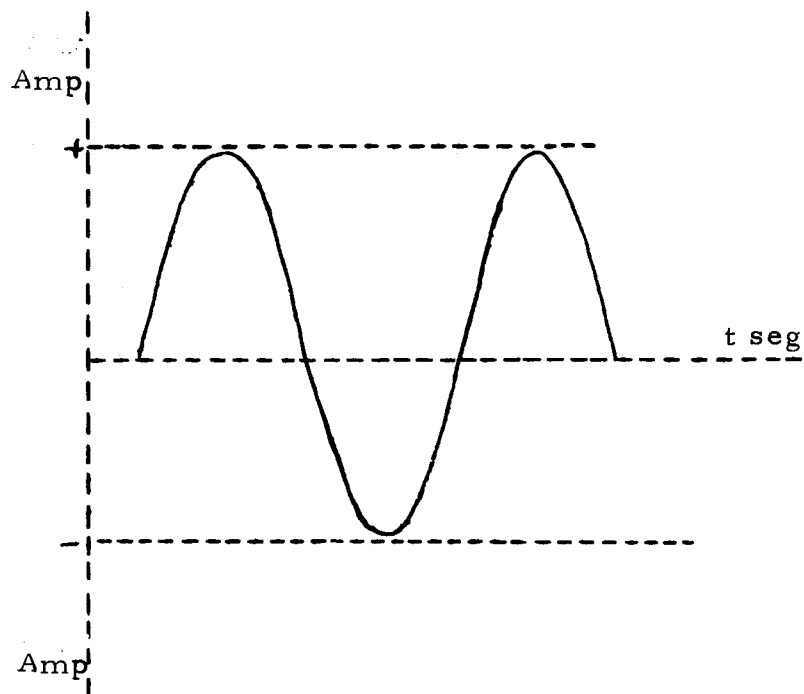


FIGURA 2. Variación de la corriente alterna

aplicación práctica es más reciente que la de la corriente continua.

Las primeras máquinas eléctricas fueron diseñadas para funcionar con corriente continua. Pronto se manifestaron ciertas desventajas

( 14 )

---

( 14 ) ROMERO D., Nelson, GAVIRIA MUÑOZ, Nelson.. Cálculo y construcción de un motor trifásico de inducción de tipo jaula de ardilla. Tesis de grado.



Que la corriente continúa no podía ser transmitida a grandes distancias sin que se produjera una gran pérdida de energía, ya que no se podía variar el voltaje; la corriente continúa era generada al mismo voltaje de consumo, por lo que la corriente total era muy elevada.

La corriente alterna puede producirse a tensiones relativamente altas, que puedan elevarse o reducirse fácilmente por medio de transformadores, con ello es posible el transporte económico de energía como corriente alterna hasta distancias considerables valiéndose de altas tensiones de transporte, lo que representa una gran ventaja ya que el peso del conductor varía en razón inversa del cuadrado de la tensión.

Por ahora no se ha llegado a conseguir ningún método práctico para elevar y reducir la tensión de la corriente continúa cuando se manejan potencias importantes.

Por tanto la corriente alterna fué gradualmente considerada como una fuente de energía más conveniente y de más fácil adaptabilidad que la corriente continúa, especialmente cuando se consideró que la corriente alterna podía convertirse fácilmente en corriente continúa. Lo contrario también podía hacerse pero resultaba más difícil y no resultaba conveniente. A pesar de ello, en el momento se hacen ensayos para transmitir corriente continúa a altos voltajes.

Existen líneas experimentales en las cuales se rectifica la corriente alterna de alta tensión por medio de convertidores electrónicos tipo de vapor, para transmitirla en forma de corriente continua. En el extremo receptor se hace la operación inversa por medio de aparatos electrónicos. Sin embargo, este sistema no se ha aplicado hasta hoy en gran escala.

La f.e.m. de corriente alterna se caracteriza por los tres parámetros principales siguientes: a) la magnitud; b) la frecuencia y c) la forma de la curva.

### 2.3 FUERZA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA EN UN CONDUCTOR

Si durante un tiempo muy pequeño  $\Delta t$ , se desplaza el conductor (Figura 3) con una velocidad  $V$  en dirección normal al campo, cortará un número de líneas de campo magnético  $\Delta \phi$ , a la vez que recorrerá un espacio infinitesimal  $\Delta C$ . El desplazamiento del conductor engendrará la superficie rectangular  $\Delta S$ . (Ver Figura 3)

Según la Ley de Faraday:

$$e = \frac{\Delta \phi}{\Delta t}$$

donde:

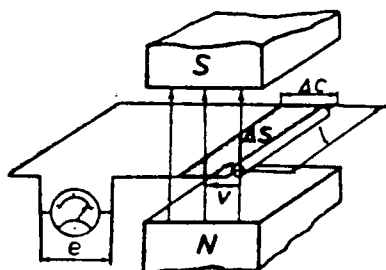


FIGURA 3 . F.E.M. inducida en un conductor

$\Delta\phi$  = flujo cortado ( wb )

$\Delta t$  = tiempo ( s )

e = f.e.m. inducida media ( v )

La inducción magnética  $\mathcal{B}$  se obtiene como cociente entre el flujo cortado  $\Delta\phi$  y la superficie abarcada  $\Delta S$ .

$$\mathcal{B} = \frac{\Delta\phi}{\Delta S} \quad \therefore \Delta\phi = \mathcal{B} \cdot \Delta S$$

La superficie formada  $\Delta S$  es el área de un rectángulo de lados  $L_x$  y  $\Delta C$ ; entonces

$$\Delta S = L_x \cdot \Delta C$$

La velocidad lineal de desplazamiento del conductor es:

$$V = \frac{\Delta C}{\Delta t}$$

Al sustituir estos valores en la ley general, resultará:

$$e = \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = \frac{\beta \Delta S}{\Delta t} = \frac{\beta_x L_x \Delta C}{\Delta t} = \beta \cdot L \cdot V$$

Obteniéndose, pues:

$$e = \beta \cdot L \cdot V$$

Sistema M. K. S.

$\beta$  = inducción ( Tesla )

L = longitud ( m )

V = velocidad ( m/s )

e = f.e.m. inducida ( v )

También es muy utilizado el sistema C. G. S., a excepción de la tensión que sigue expresándose en voltios. Teniendo en cuenta que 1. V =  $10^{-8}$  V. E. M. ( unidades electromagnéticas ) resultará la expresión:

$$e = \beta \cdot L \cdot V \times 10^{-8} \quad ( 15 )$$

( 15 ) CASADO V., Ricardo. Máquinas eléctricas tecnología 2:1. Editorial Bruño. pp.25 - 26

Sistema C.G.S.

$\mathcal{B}$  = inducción ( Gauss )

$L$  = longitud ( cm )

$V$  = velocidad ( cm/s )

$e$  = f.e.m. inducida ( v )

La forma de obtener una f.e.m. inducida en un alternador es colocando el conductor en "a" en el estator y las zapatas polares en el rotor paralelamente al eje de la máquina ( Figura 4 ). Apliquemos corriente continua a las bobinas del rotor; dicha corriente producirá una fuerza magnetomotriz que causará la aparición de un campo y una distribución de la densidad de flujo en el entrehierro como podemos ver en la Figura 5. (16 )

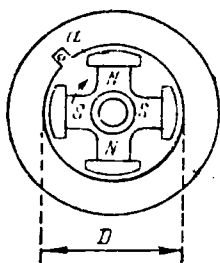


FIGURA 4 . F.E.M. de un conductor

---

( 16 ) KOSTENKO, M. P.; PIOTROVSKI, L. M. Máquinas eléctricas.  
Editorial MIR. pp. 48 - 49

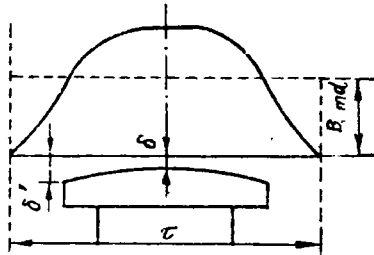


FIGURA 5 . Distribución de la inducción en el entrehierro en un paso polar

Entonces podemos afirmar que la variación en el tiempo de la f.e.m. inducida en el conductor corresponde exactamente a la curva de distribución espacial del flujo que atraviesa el entrehierro, por la circunferencia del inducido o estator de este caso ( Ver Figura 6 ).

## 2.4 CIRCUITO MAGNETICO

Para el estudio del circuito magnético principal, el problema que se plantea es el de calcular los amperios-vueltas de excitación necesarios a fin de mantener en el entrehierro de la máquina el flujo inductor que se requiere para engendrar una cierta f.e.m. prefijada  $E$ .

El flujo inductor que atraviesa el entrehierro y que constituye el flujo

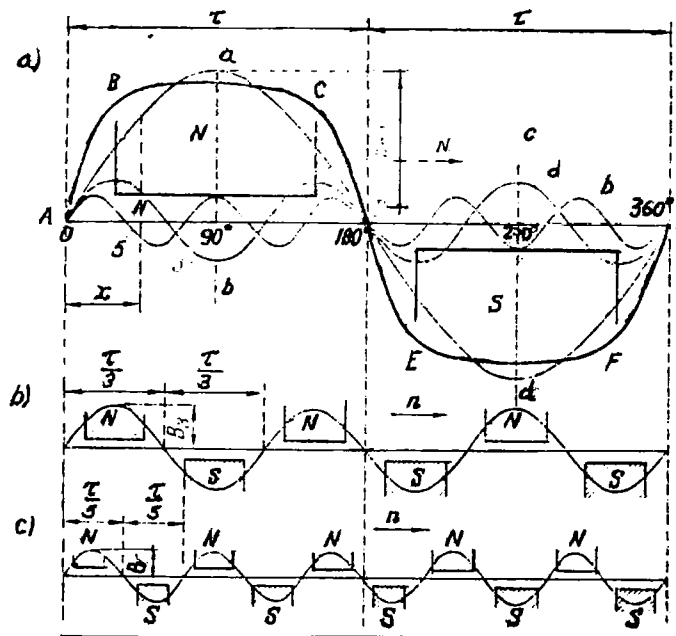


FIGURA 6 . Distribución de la inducción debajo del polo: a) descomposición de la curva de inducción en armónicos; b y c) modelos de rotores que crean el tercero y el quinto armónicos de inducción.

activo de la máquina, cierra su circuito a través de los polos salientes o lisos, los dientes y las coronas del estator y del rotor. La Figura 7 muestra la forma esquemática del circuito para los tres tipos (a.b.c.) constructivos fundamentales de las máquinas eléctricas y para la máquina (d) objeto de nuestro proyecto (17).

(17) CORRALES MARTIN, Juan. Cálculo industrial de máquinas eléctricas. Tomo I. Ediciones Danae. pp.131 - 132

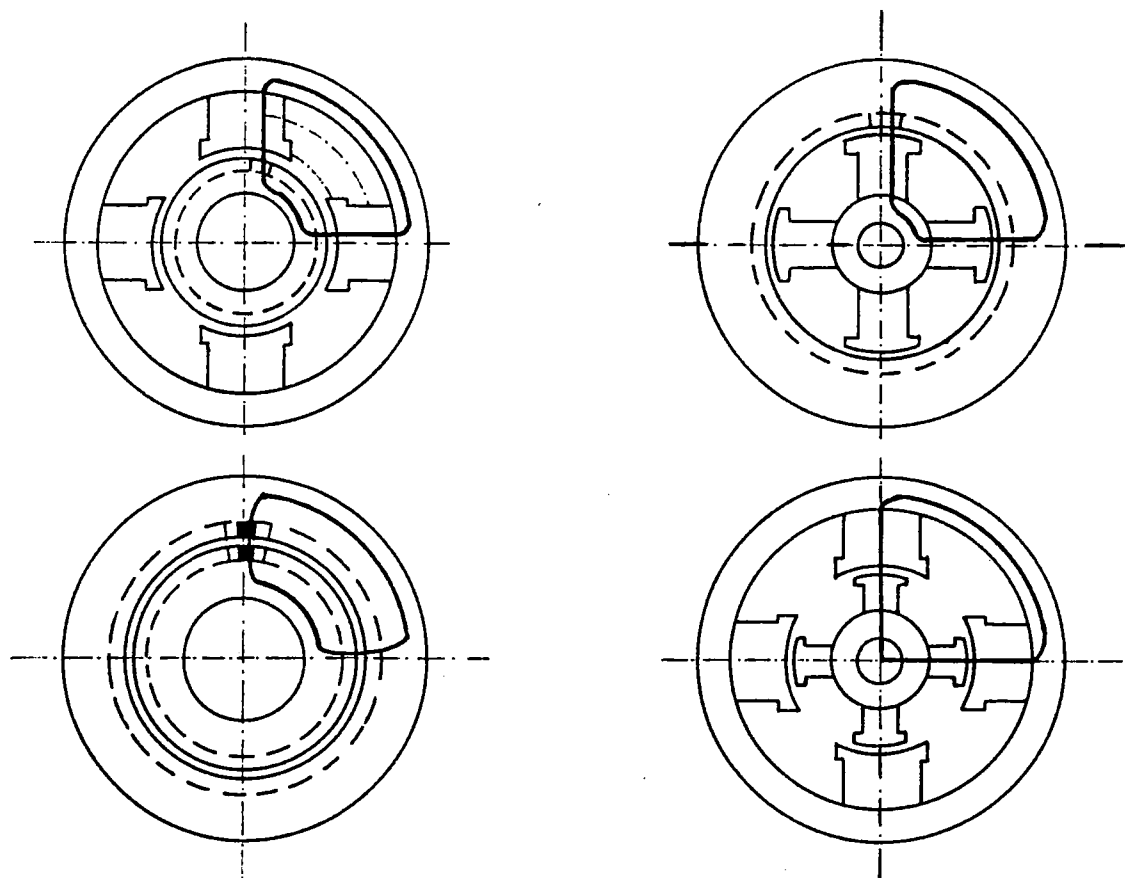


FIGURA 7 . Forma esquemática de los circuitos magnéticos de máquinas eléctricas

En a) puede verse una máquina de polos salientes en el estator ( máquinas de continua, conmutatrices, alternadores muy pequeños de algunos KVA ); en b) una máquina de polos salientes en el rotor ( alternadores normales ); en c) una máquina de rotor y estator cilíndricos ( motores asíncronos, turbogeneradores ); y en d) máquina objeto de nuestro trabajo polos salientes en el rotor y estator sobre cada figura se ha marcado el recorrido medio de las líneas de fuerza



dentro de un circuito magnético completo.

El valor de la f.e.m. está ligado al de la tensión en bornes  $V$  según las condiciones de servicio (magnitud y naturaleza de la carga) y las propiedades características de la máquina.

Para una máquina sincrónica trabajando como generador es importante la forma de la f.e.m., puesto que los armónicos superiores de f.e.m. influyen perjudicialmente no sólo sobre el propio generador como sobre los receptores provocando en ellos aumentos de las pérdidas, sino también sobre las líneas de transmisión, contribuyendo a la aparición de sobretensiones en distintos sectores de estas y ejerciendo acción inductiva sobre las líneas próximas de corriente de bajo amperaje; ahora cuando trabaja como motor la preocupación radicará en obtener una fuerza magnetomotriz lo más próximo a una senoide y naturalmente obtener una frecuencia y magnitud de acuerdo a las condiciones de trabajo de la máquina.

## 2.5 GENERACION DE UNA CORRIENTE ALTERNA MONOFASICA

Cuando el conductor de la espira ha realizado una revolución completa (Figura 8), ha descrito un arco de  $360^\circ$  o de  $2\pi$  radianes. La curva de f.e.m. ha variado entonces en un ángulo de  $360^\circ$  (Figura

ra  $2\pi$  ), o de  $2\pi$  radianes ( Figura 9 ). Si la velocidad en revoluciones por segundo ( r.p.s. ) es  $N$ , la frecuencia de la oscilación de la f.e.m. en períodos por segundo  $f$  es igual a  $N$ , puesto que, para cada revolución, la f.e.m. inducida en el conductor es un período completo de valores positivos y negativos.

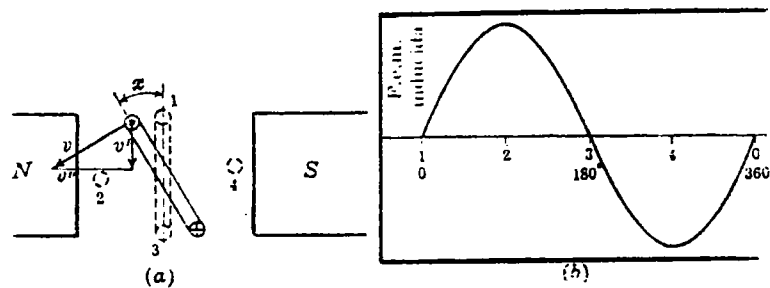


FIGURA 8 . Espira en la que se induce una f.e.m. sinusoidal

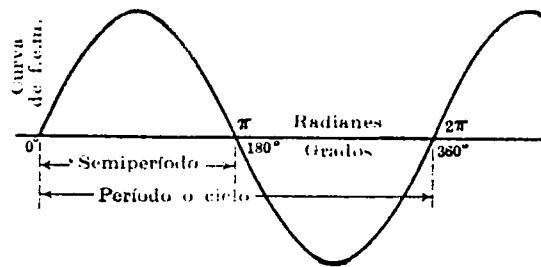


FIGURA 9 . Sinusoide de la f.e.m. inducida

Si el alternador es multipolar, con cuatro polos por ejemplo ( Figura 10 ), tan pronto como el conductor ha pasado frente a un polo N y un polo S, es decir ha pasado del 1 al 5, la curva de la f.e.m. ha



La tabla que sigue a continuación indica la relación entre la velocidad, la frecuencia y el número de polos para algunos casos tipo.

TABLA 1 . Relación entre la velocidad, número de polos y la frecuencia en una máquina

Número de polos	Velocidad ( R. P. M. )		
	60 períodos	50 períodos	25 períodos
2	3.600	3.000	1.500
4	1.800	1.500	750
6	1.200	1.000	500
8	900	750	375
40	180	150	75

En la práctica, casi todos los alternadores tienen fijos los inducidos y rotatorios los inductores o campos y pueden aplicarse las relaciones indicadas.

Cuando el conductor ha pasado de la posición 1 a 5 ( Figura 10 ), es decir, ha descrito un arco de  $180^{\circ}$ , la f.e.m. ha recorrido  $360^{\circ}$  eléctricos ( Figura 10 ). Cuando la espira ha realizado una revolución completa, ha recorrido  $360^{\circ}$  geométricos y la f.e.m.  $720^{\circ}$  eléctricos ( Figura 10 ). En una máquina de cuatro polos,  $1^{\circ}$  geométrico re

presenta 2° eléctricos. Si tiene seis polos, 1° geométrico representa 3° eléctricos, etc.

## 2.6 GENERACION TRIFASICA

### 2.6.1 Ventajas de la generación trifásica

La generación trifásica es preferible a la monofásica porque un devanado trifásico hace uso más eficiente del cobre y hierro del generador porque el flujo de potencia en un sistema trifásico es estable en vez de pulsante.

Los motores trifásicos arrancan más convenientemente y teniendo en cuenta un par constante; trabaja más satisfactoriamente que los motores monofásicos. Los grandes generadores monofásicos, debido a la potencia pulsante, vibran de mala manera y son ruidosos. La potencia trifásica puede cambiarse por el uso de transformadores apropiados a potencia de cualquier otro número de fases (es eficiente para rectificadores que se alimentan con potencia de seis o más fases).

Los sistemas trifásicos son ligeramente más económicos en general que otros sistemas polifásicos.

### 2.6.2 Principio de generación de una f.e.m. trifásica

El sistema trifásico es el que más se emplea entre los polifásicos, lo que se debe a que es el que requiere menor número de conductores entre todos los simétricos, a que las tensiones de la línea son iguales y a que con el empleo de neutro, se pueden conseguir dos tensiones diferentes.

La generación de f.e.m. en circuitos trifásicos mediante espirales sencillas que giran en el campo magnético producido por dos polos, está representada en la Figura 11,a. Tres espiras,  $a_1a$ ,  $b_1b$ ,  $c_1c$ , sujetas rígidamente y formando entre ellas ángulos de  $120^\circ$  giran en sentido contrario a las agujas del reloj. Los lados sombreados de las tres espiras forman entre sí los ángulos de  $120^\circ$  y los puntos  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , pueden denominarse terminales.

Lo mismo que los terminales  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $c_1$  y forman entre sí un ángulo de  $120^\circ$  y son terminales correspondientes. La Figura 11,d representa espiras análogas  $a_1a$ ,  $b_1b$ ,  $c_1c$  colocadas sobre un núcleo cilíndrico al de las agujas del reloj y el campo generado por dos polos. En d, las espiras se pueden ver más claramente que en a, y la dirección de la f.e.m. instantáneas inducidas está indicada por medio de las flechas.

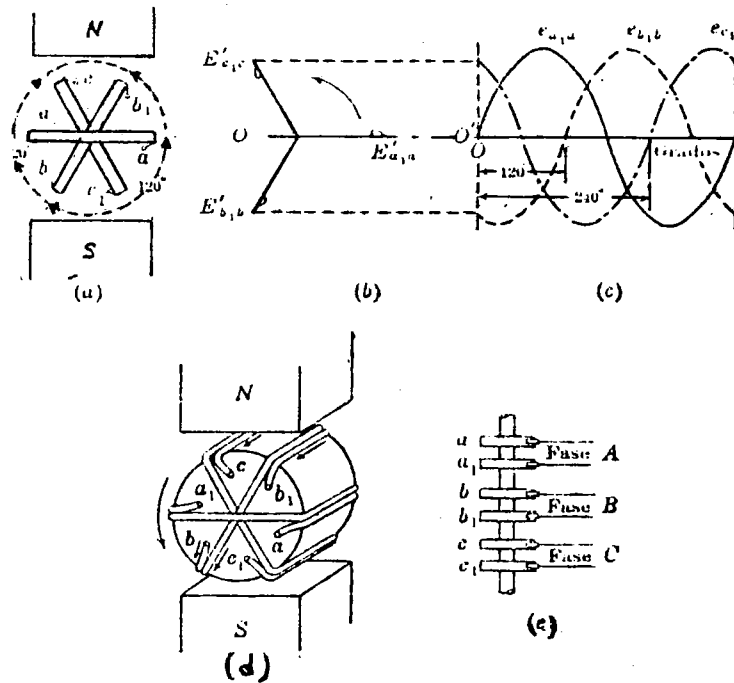


FIGURA 11 . Generación de tensiones y corrientes trifásicas

La corriente puede pasar desde las espiras al circuito exterior por medio de dos anillos, por cada una de ellas, representadas por  $a$   $a_1$ ,  $b$   $b_1$ ,  $c$   $c_1$ . En la Figura 11, e los terminales  $a$  y  $a_1$  de la espira  $a_1a$  están conectados a los anillos  $a$  y  $a_1$ , etc.

En el instante indicado en (a) y en (d) la f.e.m. inducida en la espira  $a_1a$  es nula y crece en la dirección positiva; la f.e.m. inducida en  $b_1b$  está alcanzando su valor máximo negativo, siendo negativo el terminal  $b$ ; la f.e.m. inducida en  $c_1c$  con su terminal  $c$  positivo ha rebasado su nivel máximo positivo y va disminuyendo (Figura 11, c. posición  $0^\circ$ ). También se puede considerar que estas tres

f.e.m. están engendradas por tres vectores giratorios  $E' a_1a$ ,  $E' b_1b$ ,  $E' c_1c$  (Figura 11,b), cuyas direcciones son paralelas a las espiras  $a_1a$ ,  $b_1b$ ,  $c_1c$  en (a) y en (d).

El extremo de la derecha del vector  $E' a_1a$  corresponde también a la posición del terminal a, el extremo inferior de  $E' b_1b$  corresponde a la posición del terminal b, etc.

En (c) se representan las tres sinusoides de las f.e.m. inducidas en las tres espiras. Se observará que en el instante considerado, la f.e.m. en la espira  $a_1a$  es nula y crece positivamente; la de  $b_1b$  es negativa y se aproxima a su valor máximo; la  $c_1c$  es positiva y tiende a decrecer; correspondiendo estos tres valores de la f.e.m. a la posición de las espiras en (a) y en (d). La f.e.m. en  $b_1b$  está en retraso de fase de  $120^\circ$  con relación a  $a_1a$  y la  $c_1c$  retrasa  $240^\circ$  con relación a  $a_1a$ , lo que corresponde a los ángulos entre los extremos a y b y a y c de las espiras.

La Figura 11,c prueba que en cualquier instante, la suma algebraica de las tres f.e.m. es cero.

Las ecuaciones de las tres curvas de f.e.m. son:



$$E_{a_1a} = \sqrt{2} E \sin wt$$

$$E_{b_1b} = \sqrt{2} E \sin (wt - 120^\circ) \quad (18)$$

$$E_{c_1c} = \sqrt{2} E \sin (wt - 240^\circ)$$

Siendo E el valor eficaz de cada f.e.m.

## 2.7 CAMPOS MAGNETICOS GIRATORIOS

Para comprender bien la teoría de las máquinas de alterna polifásicas, estudiaremos en particular las fuerzas magneto motriz (f.m.m.) correspondientes a un devanado trifásico como los existentes en el estator de las máquinas trifásicas sincrónicas o de inducción, se hará el análisis para dos polos o a un par de polos de un devanado que contenga n.

En las máquinas trifásicas, los devanados correspondientes a cada una de las fases están desplazados entre sí  $120^\circ$  eléctricos alrededor del entrehierro tal como están las bobinas a, -a; b, -b; c, -c en la Figura 12, las cuales aún cuando están dibujadas como concentradas abarcando un paso polar puede considerarse que representan un deva-

---

(18) DAWES, Chester L. Tratado de electricidad II. Editorial Gustavo Gili. pp. 134 - 136

nado distribuido creador de una onda senoidal de f.m.m. centrada con el eje magnético de la respectiva fase. Por consiguiente, las

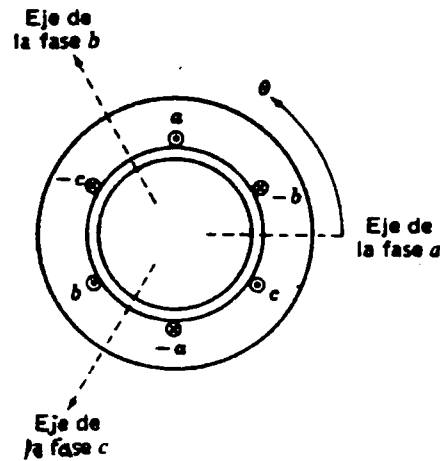


FIGURA 12 . Esquema de devanado trifásico de dos polos en el estator

tres componentes senoidales de las f.m.m. están desplazadas 120 grados eléctricos en el espacio, pero cada fase está excitada por una corriente alterna cuya magnitud varía senoidalmente con el tiempo. Estando las tres fases equilibradas, sus corrientes instantáneas son:

$$i_a = I_m \cos \omega t$$

$$i_b = I_m \cos (\omega t - 120^\circ)$$

$$i_c = I_m \cos (\omega t - 240^\circ)$$

siendo  $I_m$  la intensidad máxima y tomando como origen de tiempos el instante en el que la intensidad de la fase a pasa por un máximo

positivo. Siendo abc la secuencia de fases, la Figura 13 representa el valor instantáneo de la intensidad en cada una de ellas y los puntos y cruces en los laterales de las bobinas en la Figura se indican el sentido de las mismas.

Las respectivas ondas de f.m.m. varían senoidalmente con el tiempo: cada una de ellas representa una f.m.m. estacionaria y pulsatoria senoidalmente, distribuida alrededor del entrehierro, con su punta dirigida en el sentido del eje magnético de su fase y de amplitud proporcional al valor instantáneo de la corriente: en otras palabras, es una onda estacionaria en el espacio que varía senoidalmente con el tiempo. Cada una de estas tres componentes puede representarse por un vector dirigido en el sentido del eje magnético de su correspondiente fase y de longitud proporcional a su intensidad instantánea. La f.m.m. resultante es la suma de las componentes debidas a cada una de las tres fases.

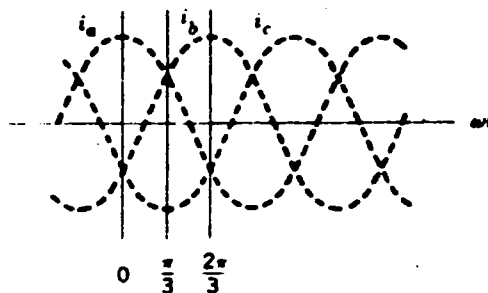


FIGURA 13 . Corrientes trifásicas instantáneas

## 2.8 REACCION DE ARMADURA EN LAS MAQUINAS SINCRONICAS TRIFASICAS

La corriente del devanado del estator de una máquina sincrónica crea una fuerza magnética cuya onda fundamental, llamada fuerza magnética de reacción de armadura, gira sincrónicamente con el rotor. La fuerza magnética de reacción de armadura influye sobre la fuerza magnética creada por el devanado de excitación y puede amplificar o debilitar el campo de excitación de la máquina y también distorsionar el campo magnético de excitación.

En un alternador sincrónico el desplazamiento de la corriente del estator  $I$  con respecto a la f.e.m.  $E_0$ , inducida en el devanado del estator, por el flujo del devanado de excitación puede estar dentro de los límites de  $-\pi/2 \leq \psi \leq \pi/2$ , donde  $\psi$  es el ángulo de desplazamiento en el tiempo entre la corriente del estator  $I$  y la f.e.m.  $E_0$

Un análisis más detallado se presenta en el capítulo 8 de este tomo.

## 2.9. CARACTERISTICAS ANGULARES DE UNA MAQUINA SINCRONICA

La potencia activa de una máquina sincrónica se expresa por medio

de magnitudes eléctricas medidas en los bornes del estator de la máquina mediante la relación conocida:

$$p = mU I \cos \varphi$$

Es más cómodo expresar la potencia por medio de las magnitudes que caracterizan la acción de los factores exteriores, con respecto al devanado del estator, sobre el régimen de su funcionamiento. Estas magnitudes son: a) la tensión de la red  $U$ ; b) la f.e.m.  $E_0$  inducida por la corriente de excitación en el devanado del estator; c) el ángulo  $\theta$  entre los vectores  $\vec{U}$  y  $\vec{E}_0$ , determinado por la posición angular del rotor con respecto al flujo magnético giratorio resultante del estator. Estas magnitudes determinan completamente el régimen de funcionamiento del devanado del estator, debido a lo cual la potencia  $P$  también se deberá determinar unívocamente por los parámetros de la máquina  $E_0$ ,  $U$  y  $\theta$ :

$$P = F(E_0, U, \theta)$$

Cuando  $U = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$  (red de potencia infinita) y  $E_0 = \text{const}$  (excitación constante) la potencia  $P$  de la máquina sólo depende del ángulo  $\theta$ , y, en este caso,  $P = f(\theta)$  se llama característica angular de la máquina sincrónica.

En los sistemas energéticos modernos las resistencias óhmicas de los devanados del estator de las máquinas sincrónicas y de las líneas son en general considerablemente menores que sus inductancias y su efecto sobre los regímenes de funcionamiento de los alternadores y de la red es pequeño.

El diagrama vectorial de tensiones de un alternador de polos salientes con una resistencia óhmica del estator  $r_a = 0$  está representado en la Figura 14. Proyectando las tensiones y las f.e.m. sobre las direcciones de los ejes  $q$  y  $d$ , obtenemos:

$$E_o = U \cos \theta + I_d X_d$$

$$0 = U \sin \theta - I_q x_q,$$

de donde

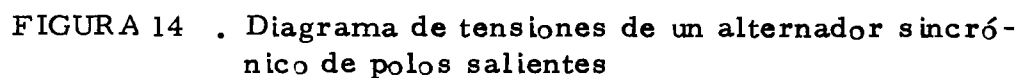
$$I_d = \frac{E_o - U \cos \theta}{x_d}$$

$$I_q = \frac{U \sin \theta}{x_q}$$

Admitiendo el plano del diagrama de la Figura 14 por plano complejo, se puede escribir:

$$\dot{U} = \dot{U} \cos \theta - j \dot{U} \sin \theta;$$

$$\dot{i} = \dot{I}_q - j \dot{I}_d$$


$$S = m \dot{U} I,$$

Sustituyendo en la igualdad anterior los valores de  $\ddot{U}$  y  $\dot{I}$ , obtenemos:

$$\begin{aligned} S &= m (\dot{U} \cos \theta + f U \sin \theta) (\dot{I}_q - J \dot{I}_d) \\ &= m (\dot{U} \dot{I}_q \cos \theta + \dot{U} \dot{I}_d \sin \theta) - j m (\dot{U} \dot{I}_d \cos \theta - \dot{U} \dot{I}_q \sin \theta). \end{aligned}$$

La parte real de  $S$  determina la potencia activa de la máquina:

$$P = m ( U I_q \cos \theta + U I_d \sin \theta ).$$

Sustituyendo en la igualdad anterior los valores de  $I_d$  y  $I_q$ , obtenemos la relación buscada:

$$S = \frac{mE_o U}{x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{x_q} \sin \theta \cos \theta - \frac{mU^2}{x_d} \sin \theta \cos \theta$$

o definitivamente

$$S = \frac{mE_o U}{x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

El primer término de la expresión

$$P = \frac{mE_o U}{x_d} \sin \theta$$

determina la componente fundamental de la potencia del alternador, que depende tanto de la tensión de la red  $U$  como de la corriente de excitación o de la f.e.m.  $E_o$ , y el segundo término

$$Q = \frac{mU^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$



determina la componente suplementaria de la potencia reactiva, que no depende de la corriente de excitación de la máquina.

Cuando no hay excitación ( $E_o = 0$ ) el alternador de polos salientes ( $x_d \neq x_q$ ) puede desarrollar una potencia  $Q$  puesto que en estas condiciones el alternador es capaz de girar sincrónicamente y desarrollar un momento giratorio, ya que el flujo de la reacción del inducido tiende a pasar a través del rotor por el camino de menor resistencia magnética.

La potencia transmitida por vía electromagnética desde el rotor del alternador sincrónico al estator a través del campo magnético del entrehierro se denomina potencia electromagnética. Una parte, generalmente pequeña, de esta potencia se gasta en cubrir las pérdidas en el acero del alternador, y la parte restante se convierte en potencia eléctrica en el devanado del estator. En adelante, por potencia electromagnética se entenderá sólo la parte que se convierte en potencia eléctrica en el devanado del estator y que designaremos con  $P_{e.m.}$ . Si adoptamos que la resistencia óhmica del devanado del estator es igual a cero y que, por consiguiente, en él no hay pérdidas, entonces la potencia electromagnética  $P_{e.m.}$  será igual a la potencia  $S$  que suministra el alternador a la red:

$$P_{e.m.} = \frac{mE_oU}{x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

## 2.10 MOMENTO ELECTROMAGNETICO

Cuando se conecta carga a un alternador, su rotor trata de frenarse, es decir, actúa como freno. Este fenómeno se conoce como momento electromagnético o par electromagnético.

El momento electromagnético se designa por las letras M.e.m. y su magnitud se determina por la potencia electromagnética Pe.m. y la velocidad angular mecánica de rotación del rotor W:

$$Me.m = \frac{Pe.m}{W} = \frac{mE_o U}{W X_d} \text{ sen } \theta + \frac{mU^2}{2W} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \text{ Sen } 2\theta$$

En una máquina sincrónica de polos salientes el momento electromagnético Me.m. también tiene dos componentes:

$$Me.m = Me.m.p + Me.m.Q$$

donde Me.m.p es llamado momento fundamental debido a la potencia activa o real de la máquina.

$$M.e.m.p = \frac{m.E_o.U \text{ Sen } \theta}{W X_d}$$

Se determina tanto por la magnitud de la f.e.m. de excitación Eo

como por la tensión en bornes del generador  $U$

$M_{e.m.Q}$  es llamado momento adicional, paramétrico, debido a la potencia reactiva de la máquina.

$$M_{e.m.Q} = \frac{mU^2}{2W} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \text{Sen } 2\theta$$

Sólo depende de la tensión en bornes y también existe en las máquinas sincrónicas no excitadas ( $E_o = 0$ ).

### 3. MATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCION DE MAQUINAS

#### 3.1 INTRODUCCION

El siguiente material ha sido extractado de los libros "Máquinas eléctricas", Tomo I M. P. KOSTENKO, L. M. PIOTROVSKI; "Materiales electrotécnicos" de la CEAC de Electricidad y de la Norma ANSI C50.10 - 1977. Se estudiarán los materiales empleados en la construcción de máquinas eléctricas. Para facilitar la explicación del tema, se han clasificado estos materiales en tres grandes grupos así:

- Materiales estructurales
- Materiales activos - conductores y magnéticos
- Materiales aislantes

### 3.2 MATERIALES ESTRUCTURALES

Son materiales estructurales los que se utilizan para la fabricación de los componentes de las máquinas, siendo su función principal la transmisión y absorción de cargas mecánicas y esfuerzos.

Entre los materiales estructurales utilizados en la ingeniería de máquinas eléctricas se incluyen: 1) fundición gris o de segunda fundición (incluyendo las especiales de armazones de dinamo), fundiciones de acero maleable y no magnético; 2) acero al carbono y acero aleado para la obtención de alta resistencia magnética y propiedades no magnéticas; 3) metales no ferreos y sus aleaciones; 4) plásticos.

Las propiedades mecánicas de los materiales se clasifican usualmente por los datos siguientes: 1) resistencia a la rotura; 2) límite de elasticidad; 3) punto de fluencia; 4) porcentaje de alargamiento; 5) módulo de resiliencia.

Cuando una máquina está en funcionamiento, el material utilizado está sometido a muchos esfuerzos complejos que cambian periódicamente, y la determinación de los factores de seguridad con respecto al límite de proporcionalidad y punto de fluencia es un problema de mucha responsabilidad, especialmente en máquinas de alta veloci-

dad ( turbogeneradores de vapor ), y en máquinas que pueden estar sometidas a grandes aumentos de velocidad { y los generadores ) durante su período de funcionamiento. El término "factor de seguridad" se refiere usualmente a la razón  $k_g = \frac{f_m}{f}$ , donde  $f_m$  es el esfuerzo con el que queda destruido parte del mecanismo o deformado de tal modo que es imposible su ulterior utilización;  $f$  es el esfuerzo calculado en la parte en cuestión del mecanismo.

### 3.3 MATERIALES ACTIVOS

Los materiales activos son conductores y magnéticos y sirven para crear las condiciones más favorables al proceso electromagnético en la máquina.

#### 3.3.1 Materiales conductores

De todos los materiales conductores, los más importantes en la ingeniería de máquinas eléctricas son el cobre y el aluminio.

El cobre tiene una resistencia específica muy pequeña en comparación con los otros metales ( excluyendo la plata ), resiste la corrosión mejor que el acero y se suelda y funde con facilidad.

El aluminio es inferior al cobre como conductor, pero es aproximadamente 3,5 veces más ligero, lo que constituye una ventaja importante.

Las principales propiedades del cobre son: peso específico  $\gamma = 8,89$  kg por  $\text{dm}^3$ ; resistividad a  $15^\circ\text{C}$ ,  $Q_{15} = 1/57 = 0,0175$  ohmio- $\text{mm}^2$  por m; coeficiente medio de resistencia de temperatura en el margen de  $0$  a  $100^\circ\text{C}$ ,  $\alpha = 0,00393 \frac{1}{\text{grado}}$ ; capacidad térmica media en el margen de  $0$  a  $100^\circ\text{C}$ ,  $C = 393$  watios segundo por grado kg; conductividad térmica  $\lambda = 3,85$  watios por cm grado.

Las cifras correspondientes al aluminio son:  $\gamma = 2,7$  kg por  $\text{dm}^3$ ;  $Q_{15} = 0,0283$  ohmios  $\text{mm}^2$  por metro;  $\alpha = 0,004 \frac{1}{\text{grado}}$ ;  $C = 910$  watios segundo por grado kg;  $\lambda = (2 \text{ a } 2,1)$  watios por cm grado.

### 3.3.2 Materiales magnéticos

De todos los materiales magnéticos existentes, los más importantes para la construcción de máquinas eléctricas son los aceros eléctricos al silicio de varios grados, el acero fundido y el hierro fundido.

Las características electromagnéticas fundamentales de estos materiales son la razón de la densidad del flujo magnético  $B$  a la intensi-

dad del campo magnético o fuerza magnetizante,  $H$ ; es decir,  $B = f(H)$  y también la relación de las pérdidas en el acero  $p_g$  (llamadas también pérdidas en el hierro) con la densidad de flujo  $B$  y la frecuencia  $f$ , es decir,  $p_g = f(B, f)$ .

- Chapa de acero eléctrico: Los circuitos magnéticos de todas las máquinas eléctricas están constituidas por acero eléctrico aleado, el cual contiene un cierto porcentaje (en peso) de silicio añadido al hierro; esto aumenta la resistividad del acero casi en razón directa al contenido de silicio, disminuyendo así las pérdidas por corrientes parásitas (o de Foucault) en el acero cuando está sometido a un campo magnético alterno. La adición de silicio en más de 1.8% aumenta notablemente la permeabilidad magnética del acero en campos magnéticos débiles, pero la disminuye algo en campos intensos. El silicio reduce también el envejecimiento del acero (envejecimiento significa aumento de las pérdidas del acero con el tiempo), pero al mismo tiempo deteriora las propiedades mecánicas del acero, en particular su aptitud de mecanización. Generalmente, se consideran aceros las aleaciones de hierro y carbono que contienen menos del 1.7% de carbono, aunque de ordinario no pase del 1%. En ciertos aceros especiales puede llegar a alcanzar el 2%.



- Clasificación: Según el porcentaje de carbono se subdividen en:

- Aceros extrasuaves ( 0.1 a 0.2% de C )
- Aceros suaves ( 0.2 a 0.3% de C )
- Aceros semisuaves ( 0.3 a 0.4% de C )
- Aceros semiduros ( 0.4 a 0.5% de C )
- Aceros duros ( 0.5 a 0.6% de C )
- Aceros extraduros ( 0.6 a 0.7% de C )

Las dimensiones ordinarias de la chapa de acero eléctrico son ( ancho por longitud ) : 750 x 1.500 mm y 1.000 x 2.000 mm; también se fabrican chapas de otras dimensiones, por ejemplo, 600 x 1.200 mm, 210 x 1.500 mm, etc.

Los espesores de las chapas normalizadas son 0,5 y 0,35 mm. Se fabrica también con espesor de 1 mm; para máquinas de frecuencias más altas se fabrican chapas de 0,2 0,15 y 0,1 mm. Las chapas de 0,42 y 0,3 mm de espesor se fabrican por pedido especial.

### 3.4 MATERIALES AISLANTES

En general, se denomina aislante eléctrico a toda sustancia de tan baja conductividad eléctrica que el paso de la corriente a través de ella puede ser despreciado. La pequeña corriente que pasa a través

del aislante se denomina corriente de fuga y la inestabilidad de ésta que puede ser tolerada, determina la clase de material que puede utilizarse como aislante.

Para el aislamiento de partes en que se pueden establecer corrientes parásitas en las máquinas eléctricas se hace uso de un gran número de materiales aislantes. El requisito fundamental en todos ellos es una alta resistencia dieléctrica o de aislamiento. Pero como el aislamiento de las máquinas está en contacto con partes que se calientan y está sometido también a los efectos del voltaje, humedad atmosférica, etc., además de la resistencia dieléctrica debe poseer propiedades de resistencia térmica, hidrófugas y anticorrosivas y ser suficientemente duradero mecánicamente.

De acuerdo a la Asociación Internacional de Normas Técnicas (ANSI) en su Norma C50.10.1977 se clasifican los materiales aislantes según la temperatura de servicio como se muestra en la Tabla 2.

La seguridad de servicio de las máquinas depende en gran parte de la impregnación de barniz por inmersión y de su secado en el horno y también de la composición de relleno entre los bobinados y de los materiales aislantes separados.

TABLA 2 . Temperaturas de referencia usadas en la determinación de pérdidas  $I^2 \times R$

Clase de sistema aislante		Referencia temperatura °C
Para grandes máquinas generadores de turbina hidráulica de alto y gran voltaje.	Para generadores de turbina hidráulica de alto y gran voltaje	
Máquinas reversibles generador/motor y condensadores sincrónicos con refrigeración de aire (Ver nota ).	Generadores reversibles generador/motor y condensadores sincrónicos con refrigeración de aire	
A	B	75
B	F	95
F		115
H		130

NOTA: Las máquinas de alto y gran voltaje son aquellas que tienen proporciones de voltaje sobre los 5.000 V y de KVA así:

Máquinas reversibles	6.250 KVA y más
Generador/motor	
Condensadores sincrónicos	10.000 KVA y más

Los barnices y composiciones comerciales utilizados para esta finalidad son muy diversos. Deben atenderse a los siguientes requisitos básicos: 1) el barniz debe tener suficiente resistencia dieléctrica; 2) debe impregnar adecuadamente los materiales aislantes; 3) la película de barniz debe ser resistente al calor y a las temperaturas normales en servicio no debe agrietarse ni perder su elasticidad.

En muchos casos los barnices deben tener buenas propiedades adhesivas. El cumplimiento de todos los requisitos estipulados es muy difícil. Los materiales aislantes más importantes para los bobinados utilizados en la construcción de máquinas eléctricas son:

- a) barnices al aceite utilizados principalmente como impregnantes;
- b) barnices asfálticos utilizados como composiciones para impregnar los bobinados en el vacío; c) barnices con solventes volátiles, utilizados como lacas para la superficie o para impregnación - goma laca, barniz de baquelita o barniz de silicona resistente al calor, etc.

#### 4. PARAMETROS PARA LA SELECCION DE MATERIALES EN EL DISEÑO DE MAQUINAS ELECTRICAS

Los factores que intervienen en la valoración de los productos siderúrgicos utilizados en la construcción de máquinas eléctricas son los siguientes:

##### 4.1 CAMPO MAGNETICO

Un campo magnético es una región del espacio en la que existe un estado magnético. En un punto determinado de esta región, el campo tiene dos características fundamentales: intensidad y dirección. Las líneas de dirección del campo magnético son cerradas y se denominan líneas de flujo. El hecho de que los campos magnéticos se cierren siempre sobre sí mismo es la base del concepto de circuito magnético.

#### 4.2 FUERZA MAGNETOMOTRIZ ( F.m.m. )

La fuerza magnetomotriz ( F.m.m. ) de un circuito magnético es la influencia magnetizante total que actúa en una parte cualquiera de dicho circuito, es decir, es capaz de mantener la circulación del flujo de inducción a lo largo del circuito magnético. La F.m.m. es directamente proporcional al flujo magnético (  $\phi$  ) y a la reluctancia ( R ) y está expresada por:

$$F.m.m. = N.I.$$

I = corriente en amperios que circula por la bobina excitadora del circuito magnético

N = número de espiras de dicha bobina

La unidad de fuerza magnetomotriz en el sistema C.G.S. es el Gilbert; en el sistema M.K.S., la unidad de fuerza magnetomotriz es el amperio ( A.V. ) que equivale a:

$$\frac{4\pi}{10} \text{ Gilbert}$$

#### 4.3 INTENSIDAD DEL CAMPO MAGNETICO ( H )

A la intensidad de campo magnético H se le llama también fuerza

magnetizante, fuerza magnética, intensidad magnética y en algunos casos, excitación magnética específica. Es una magnitud vectorial que equivale a la fuerza puntual que ejerce el campo sobre la unidad de masa situada en dicho punto.

También se define como el gradiente en el espacio de la fuerza magnetomotriz en un punto cualquiera del circuito magnético; se trata, por tanto, de la fuerza magnetomotriz por unidad de longitud y su expresión general es:

$$H = \frac{N \cdot I}{l_m}$$

I = corriente en amperios que circula por la bobina excitadora del circuito magnético

N = número de espiras de dicha bobina

$l_m$  = longitud media de la bobina en metros

Para una bobina que tiene n espiras por centímetro, la expresión anterior adopta la forma:

$$H = 0.4 \pi n I$$

La unidad de intensidad del campo magnético es el Oersted, equivalente a un Gilbert por cm. También se usa como unidad el amperio -

vuelta por metro ( AV/m ) que equivale a  $4. \pi . 10^{-3}$  Oersted.

#### 4.4 FLUJO MAGNETICO ( $\phi$ )

El flujo magnético  $\phi$  es el número total de líneas de fuerza que atraviesan una superficie, normal a la dirección del campo magnético y es producido por una fuerza magnetomotriz cuando varía la magnitud de la tensión inducida o las condiciones magnéticas. Está definida por

$$\phi = \mu_o HS$$

$\mu_o$  = permeabilidad magnética ( definida más adelante )

H = intensidad del campo magnético, en Oersteds

S = sección transversal del campo magnético, en cm<sup>2</sup>

En el sistema C.G.S., la unidad de flujo magnético es el Maxwell.

En el sistema M.K.S., la unidad de flujo es el Wewber, que equivale a  $10^8$  Maxwell.

#### 4.5 INDUCCION MAGNETICA ( $\beta$ )

La inducción magnética  $\beta$ , llamada también densidad de flujo magnético, es el flujo por unidad de superficie en una sección perpendi-



cular a la dirección del flujo y se define por la ecuación:

$$\mathcal{B} = \frac{d\phi}{dS} \quad \frac{\text{webers}}{\text{m}^2} \quad \text{ó} \quad \frac{\text{maxwell}}{\text{cm}^2}$$

En el sistema C.G.S., la unidad de inducción magnética es el gauss, igual a un maxwell por cm<sup>2</sup>. En el sistema M.K.S., la unidad de inducción es la Tesla ( T ) que equivale a 10<sup>4</sup> Gauss.

$$1 \frac{\text{webber}}{\text{m}^2} = 1 \text{ Tesla}$$

$$1 \frac{\text{Maxwell}}{\text{cm}^2} = 1 \text{ Gauss}$$

La inducción también puede expresarse por:

$$\mathcal{B} = \mu_0 H = 1$$

$$\mathcal{B} = \mu_0 \frac{N \cdot I}{l_m}$$

Por lo general el estado magnético de un cuerpo se caracteriza por el valor de la inducción.

#### 4.6 PERMEABILIDAD MAGNETICA ( $\mu_0$ )

La permeabilidad magnética  $\mu_0$  es la relación entre el valor de la inducción magnética en un medio y la fuerza magnética en ese medio, es decir,

$$\mu_0 = \frac{B}{H} \text{ debido a que } B = \frac{\mu_0 NI}{lm} = \mu_0 H$$

donde:

$\mu_0$  = es la permeabilidad del medio. Como  $\mu_0$  es constante, la densidad de flujo es proporcional a la intensidad magnética.H.

Cuando hay la presencia de algún material ferromagnético, la densidad de flujo es diferente de modo que:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{lm} + B'$$

Donde  $B'$  es la contribución del material magnético a la densidad de flujo total. Observaciones experimentales muestran también que puede ser expresada en términos de H por la expresión:

$$B = \mu H$$

donde:

$$H = \frac{NI}{lm}$$

Para materiales ferromagnéticos,  $\gamma$  es una cantidad variable, usualmente mucho mayor que la unidad.  $\beta'$  es llamada densidad de flujo intrínseco. Sustituyendo la ecuación  $\beta = \gamma H$  en la ecuación  $B = \frac{\mu_0 NI}{lm} + \beta'$  obtendremos:

$$B = \mu_0 H + \gamma H = \mu H$$

donde:

$$\mu = \mu_0 + \gamma \text{ es llamada la permeabilidad del material magnético}$$

$\mu$  es una cantidad variable para materiales ferromagnéticos, frecuentemente más grande que  $\mu_0$ . La unidad de  $\mu$  es la misma que la de  $\mu_0$ , o sea webers por ampere-vueltas metro. También definiremos una cantidad sin dimensión  $\mu_r$ , llamada permeabilidad relativa, dada por la relación

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

#### 4.7 PERMEANCIA ( $\mathcal{P}$ )

La permeancia  $\mathcal{P}$  es la propiedad de un circuito magnético o de una

parte cualquiera de un circuito magnético que determina el flujo magnético total correspondiente a una fuerza magnetomotriz dada, es decir, es el inverso de la reluctancia.

$$\mathcal{P} = \frac{1}{R}$$

En un circuito lineal uniforme, la permeancia se expresa por:

$$\mathcal{P} = \frac{\mu_0 S}{l_m}$$

$l_m$  = longitud media del circuito en cm

$S$  = sección transversal en cm<sup>2</sup>

$\mu_0$  = permeabilidad, supuesta constante

#### 4.8 RELUCTANCIA

La reluctancia  $\mathcal{R}$  es la inversa de la permeancia, o sea:

$$\mathcal{R} = \frac{1}{\mathcal{P}} = \frac{l_m}{\mu_0 S}$$

La expresión de reluctancia en función de la fuerza magnetomotriz y del flujo magnético es la siguiente:

$$\mathcal{R} = \frac{F.m.m.}{\phi}$$

La unidad de reluctancia no tiene nombre especial y corresponde a la reluctancia de un circuito magnético lineal uniforme, en el vacío, de una longitud de 1 cm y de una sección transversal de 1 cm<sup>2</sup>

#### 4.9 SATURACION

En la Figura 15 se observa que B varía linealmente con H para valores pequeños de H; pero conforme H tiende a incrementarse la variación de B gradualmente decrecerá y para valores grandes de H la curva caerá, a tal grado que, aunque H crezca rápidamente, B prácticamente se mantendrá sin incrementarse. Esta característica es conocida como saturación.

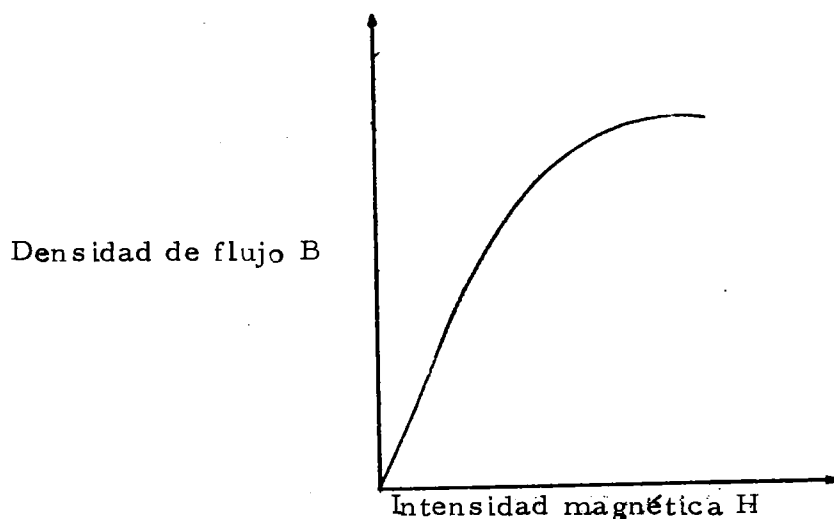


FIGURA 15 . Curva B versus H

#### 4.10 HISTERESIS Y RETENTIVIDAD

Supongamos una pieza de material ferromagnético en el interior de una bobina. La variación de  $B$  con respecto a  $H$  se muestra en la Figura 16. Para empezar, supondremos que el material está en un estado neutro; esto es, que no está magnetizado. La corriente en el embobinado es cero y esta condición es representada por el punto 0 en la Figura 16. La intensidad magnética  $H$  es incrementada al aumentar la corriente en el embobinado de excitación. La densidad de flujo  $B$  se incrementa a lo largo de la curva  $Ob$ , la cual es igual a la curva mostrada en la Figura 15. En  $b$ ,  $H = H_{\text{máx}}$  y  $B = B_{\text{máx}}$ . La intensidad magnética es ahora disminuida gradualmente. Al contrario de lo que se puede esperar, la densidad de flujo varía a lo largo de una curva diferente  $bd$ . Para un valor específico de  $H$ , el valor de  $B$  es más grande cuando  $H$  se disminuye, que cuando se incrementa. Se dice entonces que el flujo se retrasa con respecto a la intensidad magnética. Esta característica de los materiales ferromagnéticos es conocida como histéresis. Observe que en el punto  $d$ , aunque  $H$  es cero,  $B$  no lo es. La tendencia del material magnético de retener algo del magnetismo aún después de remover la fuente de excitación, es conocida como retentividad. La ordenada  $Od$  es la densidad de flujo residual.

Si se hace circular la corriente en dirección opuesta y es incrementada gradualmente, el material magnético se magnetizará en dirección opuesta. La densidad de flujo  $B$  varía a lo largo de la curva  $dc b'$ , La intensidad magnética  $O c$  es llamada fuerza coercitiva o coercitividad. En el punto  $b'$  la intensidad magnética es  $-H_{\text{máx}}$  y la correspondiente densidad de flujo es  $-B_{\text{máx}}$ .

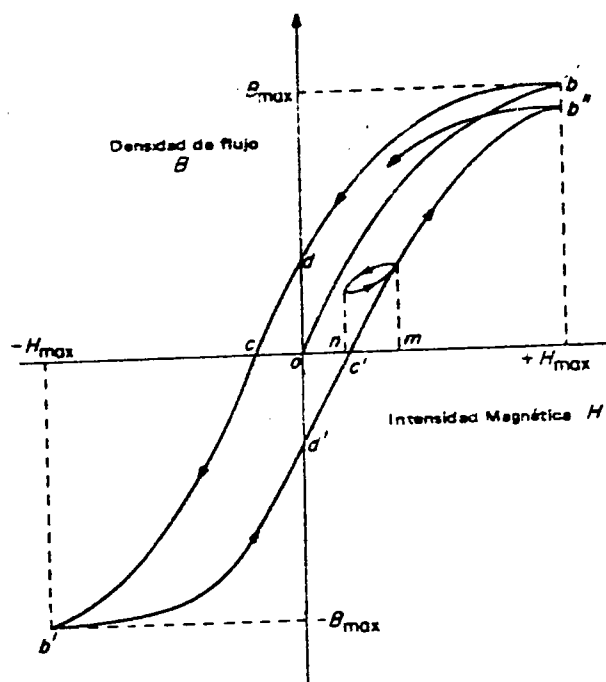


FIGURA 16 . Efecto de histéresis de un material ferromagnético

Si gradualmente se disminuye la intensidad magnética, la densidad de flujo varía a lo largo de la curva  $b'd'b''$  debida a la histéresis. El punto  $b''$  difiere de  $b$  por una pequeña diferencia por lo cual la curva no llega a cerrarse todavía. Si el material es sujeto a ciclos repetidos

de magnetización, la curva B contra H formará finalmente un anillo cerrado. Este anillo es conocido como el anillo o ciclo de histéresis. La amplitud de B depende de la amplitud de H y la forma del anillo depende del material ferromagnético usado.

#### 4.11 REMANENCIA

Es la densidad de flujo que permanece en un material magnético después de haber suprimido a la fuerza de magnetización externa.

#### 4.12 RETENTIVIDAD

Es la densidad de flujo que permanece en un material después de haber aplicado y removido una fuerza magnética suficiente para causar la saturación del material. La retentividad puede ser considerada como el valor máximo de la remanencia.

#### 4.13 DENSIDAD DE FLUJO RESIDUAL

En un material magnético, es el valor de la densidad de flujo correspondiente a la intensidad magnética cero, cuando el material es simétrica y cíclicamente magnetizado.



#### 4.14 FUERZA COERCITIVA

Es la magnitud de la intensidad magnética a la cual la densidad de flujo es cero cuando el material es cíclica y simétricamente magnetizado. Si el material es magnetizado solamente hasta su saturación y posteriormente desmagnetizado, la fuerza coercitiva es llamada coercitividad.

#### 4.15 PERDIDA DE ENERGIA EN LOS NUCLEOS FERROMAGNETICOS

Cuando son disminuídos los campos magnéticos asociados con núcleos ferromagnéticos, parte de la energía almacenada es regresada a la fuente o convertida en alguna otra forma útil de energía. Sin embargo, parte de la energía almacenada se pierde irremediabilmente en el núcleo en forma de calor. Esta pérdida de energía es debida a dos causas: a) característica de histéresis del material y b) corrientes inducidas en el núcleo. ( Estas corrientes son llamadas corrientes parásitas ). También se tienen pérdidas de energía en núcleos sujetos a magnetizaciones y desmagnetizaciones cíclicas por medio de excitaciones periódicas. Analizaremos primeramente la pérdida de energía debida a la histéresis.

#### 4.15.1 Pérdidas de histéresis

Supongamos que un núcleo ferromagnético es excitado por una bobina alimentada de una fuente de variación periódica de corriente y que la onda de histéresis ( curva  $B$  vs.  $H$  ) del material magnético es como se muestra en la Figura 17.

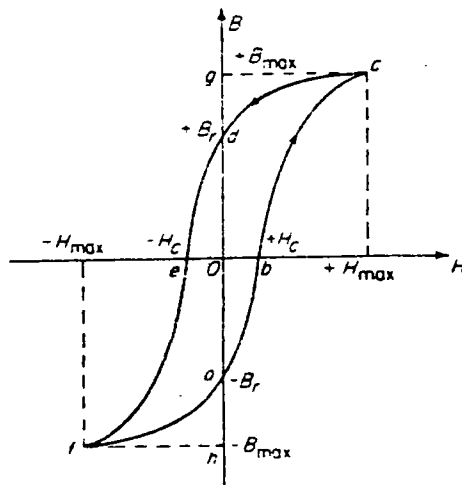


FIGURA 17 . Anillo de histéresis de un material ferromagnético

Supongamos que la amplitud de la fuerza magnetizante varía entre  $+H_{\text{máx}}$  y  $-H_{\text{máx}}$  y la correspondiente variación de la densidad de flujo es de  $+B_{\text{máx}}$  a  $-B_{\text{máx}}$ . Considérese un ciclo completo de magnetización a - b - c - d - e - f - a. Durante la parte ac del ciclo,  $H$  se incrementa de 0 a  $H_{\text{máx}}$  y  $B$  se incrementa de  $-B_r$  a  $+B_{\text{máx}}$ , la energía absorbida por el campo magnético y almacenada durante esta parte del ciclo es

$$W_{ac} = V \int_{-B_r}^{+B_{max}} H . dB$$

El signo positivo de  $W_{ac}$  se verifica fácilmente por el hecho de que  $H$  es positivo y que el límite superior de integración es más grande que el inferior. Si esta energía es dividida por el volumen del núcleo  $V$ , obtendremos la densidad de energía  $W_{ac}$ , que es representada por el área sombreada de la Figura 18, a.

Ahora bien, durante la porción  $cd$  del ciclo,  $H$  disminuye de  $+H_{máx}$  a  $O$  y  $B$  disminuye de  $+B_{máx}$  a  $B_r$ . Debido a la histéresis, la disminución tiene lugar a lo largo de una curva diferente de la que se tomó en cuenta cuando se incrementó la densidad de flujo. La energía es regresada a la fuente durante esta parte del ciclo porque

$$W_{cd} = V \int_{+B_{máx}}^{+B_r} H . dB$$

es negativa. El área sombreada de la Figura 18, b representa la densidad de energía correspondiente a esta porción.

Durante la parte  $df$  del ciclo, el núcleo es magnetizado en sentido opuesto y la energía es absorbida por el campo porque

$$W_{df} = V \int_{+B_r}^{-B_{máx}} H . dB$$

es positiva. Observe que el límite superior es menor que el límite inferior y  $H$  es negativo. El área sombreada en la Figura 18,c representa a la densidad de energía para esta porción.

Finalmente, durante el segmento  $fa$  del ciclo, se regresa la energía a la fuente porque

$$W_{fa} = V \int_{-B_{\text{máx}}}^{B_r} H \cdot db$$

es negativo. Para esta última parte, la densidad de energía la representa el área sombreada de la Figura 18,d . La energía neta absorbida por el campo magnético durante un ciclo completo de magnetización es:

$$\begin{aligned} W_h &= W_{ac} + W_{cd} + W_{df} + W_{fa} \\ &= V ( W_{ac} + W_{cd} + W_{df} + W_{fa} ) \\ &= V ( \text{área del anillo de histéresis} ) S_1 S_2 \end{aligned}$$

donde  $S_1$  y  $S_2$  son los factores de escala. Por ejemplo, si las líneas del papel gráfico usado son acotadas en centímetros, entonces en la gráfica  $S_1$  es el número de ampere-vueltas por metro por centímetro y  $S_2$  es el número de webers por metro cuadrado por centímetro. El área es medida en centímetros cuadrados y la energía es expresada en joules o en watt-segundos.

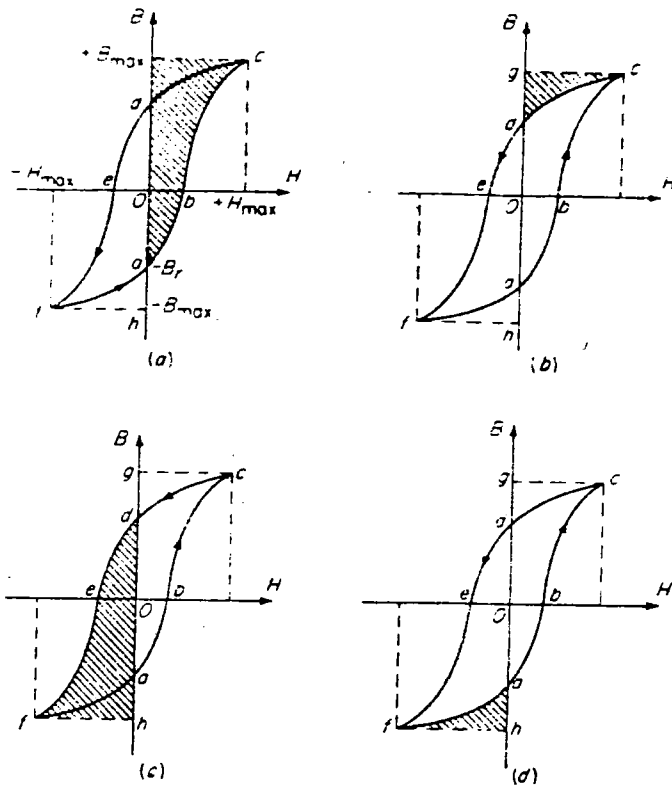


FIGURA 18 . Pérdida de histéresis por ciclo de magnetización de un material ferromagnético

La energía  $Wh$  no se regresa a la fuente, sino que es disipada en el material ferromagnético en forma de calor. Como esta pérdida de energía es debida a la característica de histéresis del material, se llama pérdida de histéresis. El término  $Wh$  representa a la pérdida de histéresis por ciclo por unidad de volumen del material magnético.

En la práctica, es conveniente hablar de pérdida de energía por se -

guído en un núcleo. Si el número de ciclos de magnetización completa por segundo es  $f$  ( $f$  es la frecuencia de la señal de excitación periódica), entonces la pérdida en un segundo debido a la histéresis es dada por

$$P_h = W_b$$

por unidad de volumen de núcleo. Esta relación es independiente de la forma de onda de la fuente de excitación, o de la forma de onda del flujo  $\phi(t)$ . Depende solamente de la amplitud de la densidad de flujo, la frecuencia de la fuente y la naturaleza del material magnético. En este análisis estamos suponiendo que no hay anillos menores dentro del anillo principal de histéresis.

#### 4.15.1.1 Fórmula de Steinmetz para pérdidas de histéresis

Para el cálculo de las pérdidas de histéresis es frecuente usar una fórmula empírica propuesta por C. P. Steinmetz en 1892. De acuerdo a esta fórmula, deducida por Steinmetz de un gran número de observaciones y mediciones experimentales, la pérdida de energía debida a la histéresis en un material magnético está dada por

$$W_h = (B_{\text{máx}})^n$$

por unidad de volumen por ciclo, donde  $n$  (llamado coeficiente de Steinmetz) es una constante cuyo valor depende del material y del

sistema de unidades usado, y  $n$  (llamado exponente de Steinmetz) usualmente se supone con un valor de 1.6.

La ecuación anterior tiene que ser usada con precaución porque, aún para el mismo material, los mismos valores de  $\eta$  y de  $n$  no proporcionan resultados aproximados si la densidad de flujo varía en un amplio rango. Valores que son correctos para pequeñas densidades de flujo pueden no serlo para las grandes. Además el valor de  $n = 1.6$  propuesto originalmente por Steinmetz no es satisfactorio para muchas de las nuevas aleaciones de acero que han entrado en uso en los años recientes y que no existían en su época. La fórmula, sin embargo, es todavía muy útil en aplicaciones donde la pérdida de histéresis es conocida a una cierta densidad de flujo  $B_{\text{máx}}$  y se requiere calcular la pérdida a otro valor de  $B_{\text{máx}}$  en el mismo rango y quizás en otra frecuencia. Una ventaja importante de esta fórmula es que es independiente de la forma de onda.

Si  $f$  es la frecuencia de magnetización en ciclos por segundo, entonces la pérdida de potencia debida a la histéresis es:

$$\text{Pérdida de potencia debida a la histéresis } P_h = \eta f (B_{\text{máx}})^n$$

por unidad de volumen. Si  $V$  es el volumen del núcleo de material magnético, la pérdida total en el núcleo debida a la histéresis es

dada por

$$P_h = \eta V f (B_{\text{máx}})^2$$

#### 4.15.2 Pérdidas por corrientes parásitas

Si el campo magnético establecido en un núcleo ferromagnético varía con el tiempo, se induce un voltaje en el núcleo, ocasionando en éste una circulación de corriente. El núcleo tiene una resistencia finita, por lo tanto se disipa energía debido a pérdidas óhmicas. No se debe confundir estas corrientes con la que circula en el embobinado de excitación ni tampoco confundir la pérdida óhmica en el núcleo con la que se tiene en el embobinado. Ahora se obtendrá una expresión para la pérdida por corrientes parásitas.

##### 4.15.2.1 Cálculo de las pérdidas debidas a las corrientes parásitas

La pérdida de potencia promedio debida a las corrientes parásitas, está dada por la siguiente relación:

$$P_e (\text{promedio}) = \frac{w^2}{12 \rho N^2 A^2 T} \int_0^T [e(t)]^2 dt = K_e E_{ef}^2$$

donde



$$K_e = \frac{w^2}{12pN^2A^2}$$

porque

$$\frac{1}{T} \int_0^T [e(I)]^2 dt = E_{ef}^2$$

W = espesor del núcleo ferromagnético

A = área de la sección transversal del núcleo

T = período en segundos

P = coeficiente de resistividad del material

N = número de vueltas del bobinado de excitación

K<sub>e</sub> = coeficiente de pérdidas de potencia instantánea

#### 4.15.3 Pérdidas en el núcleo

El total de pérdidas de potencia en un núcleo es la suma de las pérdidas debidas a la histéresis y a las corrientes parásitas. Son llamadas pérdidas en el núcleo, pérdidas en el hierro o pérdidas de excitación y son designadas por P<sub>c</sub>, donde

$$P_c = P_h + P_e$$

Esta ecuación da la totalidad de las pérdidas en el núcleo. Podemos también expresar las pérdidas en el núcleo por unidad de volumen, como  $P_c = P_h + P_e$

## 5. PARAMETROS DE DISEÑO DEL ALTERNADOR

### DIDACTICO

#### 5.1 INTRODUCCION

Las dimensiones de la máquina dependen de las características de la máquina y de los coeficientes de trabajo electromagnético que se adopten y estos a su vez determinan muchas de las características que se derivan en funcionamiento normal o en condiciones excepcionales.

Tampoco aquí es posible resolver el problema matemáticamente en todos sus aspectos planteando una serie de ecuaciones con otras tantas incógnitas para llegar a la solución por vía directa.

Además, no basta, al menos en teoría, con llegar a una solución, sino que esta solución debiera ser la mejor posible o a veces una solución de compromiso entre condiciones incompatibles, sin olvidar el aspecto económico.

Todo ello hace que el procedimiento a seguir sea el de basarse como punto de partida de la experiencia de máquinas ya elaboradas cuyo comportamiento haya sido satisfactorio introduciendo, sin embargo, las modificaciones que el buen juicio aconseje con vista a lo que se espera conseguir o a los recursos disponibles y comprobar después por los métodos de estudio adecuados las propiedades que la caracterizan.

## 5.2 PARAMETROS FUNDAMENTALES

Aunque las características de servicio a tener en cuenta sean muy numerosas y las leyes que rigen el funcionamiento de la máquina intervengan, correlativamente también en gran número hemos podido ya entrever la cantidad de parámetros fundamentales a los que vienen ligados todas estas características son abundantes dada la multiplicidad de problemas que se plantean.

Establecemos las dimensiones de acuerdo con los datos que la experiencia, las normas o el buen criterio señalan sobre los valores más adecuados de dichos parámetros. En vista de que se trata de una máquina para fines didácticos, que el servicio a prestar es del tipo intermitente y que la potencia de carga conectada al equipo debe ser baja, se adoptó una potencia en bornes de 0.25 K.V.A.

Asumimos un factor de potencia aceptable de  $\cos \varphi = 0.85$ , el cual nos garantiza los fines perseguidos con el equipo.

Adoptamos que cada bobina inducida genere 127 V como tensión de fase, con lo cual obtendremos una tensión de línea de 220 V cuando la máquina se disponga para un trabajo trifásico en estrella, tomando como base que la velocidad de la máquina motriz es de 1.800 r.p.m. y que la frecuencia deseada es 60 Hz se determina el polo del alternador.

### 5.3 DATOS PRINCIPALES DEL ALTERNADOR DIDACTICO

Potencia aparente en bornes	$S = 0.25 \text{ KVA}$
Factor de potencia normal	$\cos \varphi = 0.85$
Tensión de línea	$u = 220 \text{ V}$
Número de fases	$m = 3$
Frecuencia	$f = 60 \text{ Hz}$
Velocidad de giro	$N = 1.800 \text{ r.p.m.}$
Eje	Horizontal

### 5.4 CALCULOS

Fijados estos valores, determinaremos el número de pares de polos.

$$p = \frac{f \times 60}{N} = \frac{60 \times 60}{1.800} = \frac{3.600}{1.800} = 2$$

$$p = 2 \text{ pares de polos}$$

$$p = 4 \text{ polos}$$

La potencia activa de la máquina es:

$$P = S \times \cos \varphi$$

$$P = 250 \times 0.85$$

$$P = 212.5 \text{ W} = 0.212 \text{ Kw}$$

La potencia reactiva es:

$$Q = S \sin \varphi$$

$$Q = 250 \times \sin 31.47$$

$$Q = 131.69 \text{ VAR} = 0.131 \text{ KVAR}$$

La corriente activa por fase que se presentará es la siguiente:

$$I_f = \frac{\sqrt{3} S}{m u} = \frac{\sqrt{3} \times 250}{3 \times 220} = 0.656 \text{ amperios/fase}$$

$$I_f = 0.656 \text{ amperios/fase}$$

La corriente reactiva que puede circular es la siguiente:

$$I_r = \frac{\sqrt{3} Q}{m u} = \frac{\sqrt{3} \times 131.69}{3 \times 220} = 0.345 \text{ amperios/fase}$$

$$I_r = 0.345 \text{ amperios/fase}$$

## 5.5 VELOCIDAD DE EMBALAMIENTO

Será la velocidad máxima que podrá alcanzar el sistema en caso de falla sin deterioro mecánico. El valor recomendado según referencia ( 19 ) es 1.8 de la velocidad nominal.

$$N_{\alpha C} = 1.8 \times 1.800 = 3.240 \text{ r.p.m.}$$

$$N_{\alpha C} = 3.240 \text{ r.p.m.}$$

## 5.6 AISLAMIENTO

Se utilizará aislamiento clase B ya que es el más adecuado para climas tropicales y resistente a temperaturas permanentes máximas de 120°C.

## 5.7 VENTILACION

---

(19 ) CORRALES MARTIN, Juan. Cálculo industrial de máquinas eléctricas. Tomo II. Editorial DANE. p.222

El sistema será autoventilado debido a la velocidad de giro y al inductor corto.

## 6. CALCULO DEL ESTATOR

Inicialmente para este cálculo es necesario hacer uso de las experiencias en diseños y ayudarse con las tablas y factores establecidos y luego hacer los ajustes necesarios para que la máquina tenga un funcionamiento óptimo. Para el diseño del estator y rotor ( Capítulos 6 y 7 ) se tomó como referencia bibliográfica los libros "Cálculo industrial de máquinas", Tomos I y II de Juan CORRALES MARTIN y "Diseño de aparatos eléctricos" de John KULLMAN.

### 6.1 VALORES PROVISIONALES

Debido a que la máquina deberá cumplir a la vez numerosas características de servicio y leyes que rigen su funcionamiento, se hace necesario obtener primero valores provisionales en cada uno de los parámetros y luego efectuar las correcciones que sean necesarias.

El primer paso será obtener el diámetro y la longitud del estator .

Para esto será necesario asumir algunos valores siendo el más im-



portante la relación entre la longitud y el paso polar " $\lambda$ ", el cual nos da una idea del grado relativo de aprovechamiento del acero y el cobre de la máquina. En general se toma  $\lambda < 1$ . Pero existe una gran relación entre la selección de este parámetro y el destino de la máquina.

Para determinar el valor de  $\lambda$  debemos basarnos en máquinas ya construídas. Estos valores son presentados en la Figura 19 tomada del libro "Cálculo industrial de máquinas eléctricas" de Juan CORRARES MARTIN, pág 168. Con  $\lambda$  en función del número de pares de polos, dependiendo si éstas son cilíndricas o rectangulares.

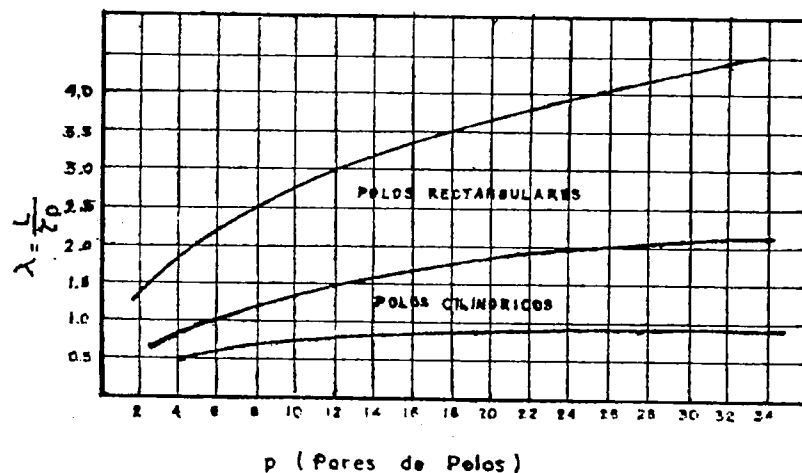


FIGURA 19. Relación  $\lambda = \frac{L}{\tau}$  para alternadores de polos salientes

A partir de esta gráfica tomamos un valor de  $\lambda = 0.5$ , con este valor entramos a la Figura 20 en la cual se relaciona la potencia en KVA por par de polos respecto al paso polar  $\gamma_p$  en cm. Calcularemos la potencia por par de polos:

$$\frac{S}{P} = \frac{0.250 \text{ KVA}}{2} = 0.125 \text{ KVA/par de polos}$$

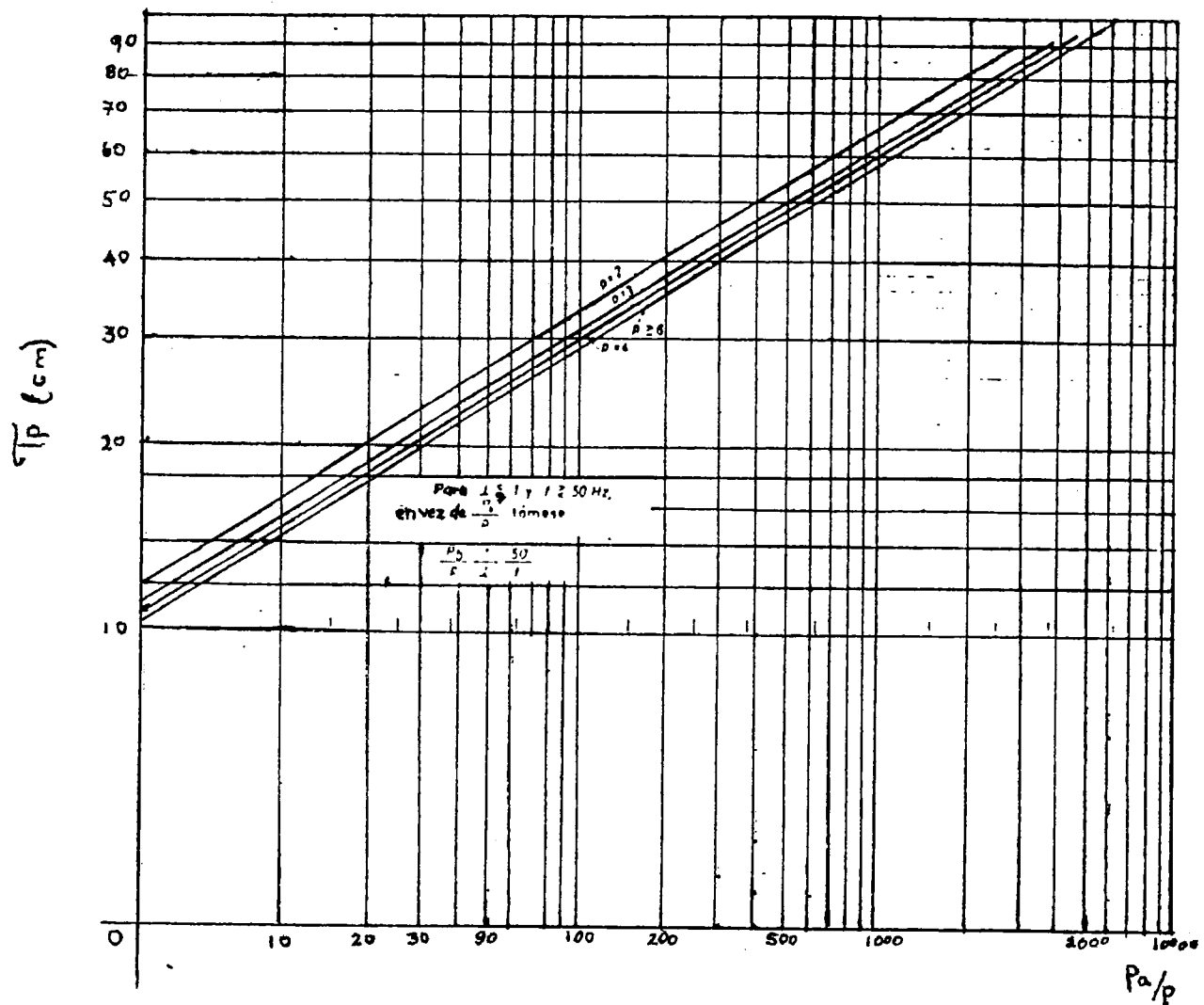


FIGURA 20. Paso polar T en función de la potencia aparente por par de polos  $P_a/p$

De acuerdo a la figura, el paso polar para la potencia por par de polos especificada es:

$$\tau_P = 12 \text{ cm} = 120 \text{ mm}$$

Con este dato podemos obtener a continuación el valor del diámetro interno y la longitud axial del inducido.

$$D = \frac{2P \cdot \tau_P}{\pi} = \frac{2 \times 2 \times 120}{3.1} = 154.9 \text{ mm}$$

$$D = 154.9 \text{ mm}$$

$$L = \lambda \cdot \tau_P = 0.5 \times 120 = 60 \text{ mm}$$

En virtud de tener unos parámetros más recomendables de trabajo y sin perjuicio del funcionamiento de la máquina, adoptamos los siguientes valores para el diámetro y la longitud:

$$D = 200 \text{ mm}$$

$$L = 40 \text{ mm}$$

De acuerdo a lo anterior, el nuevo valor del paso polar es:

$$\tau_P = \frac{\pi \cdot D}{2P} = \frac{\pi \times 200}{4} = 155 \text{ mm}$$

## 6.2 RECUBRIMIENTO POLAR

El recubrimiento polar  $\psi$  es el cociente entre el arco polar "b" y el paso polar "T". Este parámetro analíticamente es:

$$\psi = 2.58 K_f^2 - 1.79 K_f - 0.06 \text{ con } (0.5 < \psi < 0.8)$$

Donde " $K_f$ " es el llamado "factor relativo de forma" que depende de la forma del entrehierro.

Asumiendo un  $\psi$  de 0.66 que es un valor muy frecuente tenemos que:

$$K_f = 0.98$$

## 6.3 FACTOR DE BOBINADO

El factor de bobinado " $k$ " es el producto de dos factores: el factor de acortamiento " $k_y$ " por el factor de distribución " $k_d$ ". El factor de acortamiento se puede expresar también por la magnitud relativa de reducción de paso.

Siendo " $y_n$ " la distancia entre dos ranuras que contienen una misma

espira, podemos decir que al paso del devanado le corresponde un ángulo  $\frac{Y_n}{T_p} \pi$  y el desplazamiento de f.e.m. para los  $\nu$  armónicos será  $\frac{Y_n}{T_p} \pi \nu$ . La Figura 21 ilustra lo anterior.

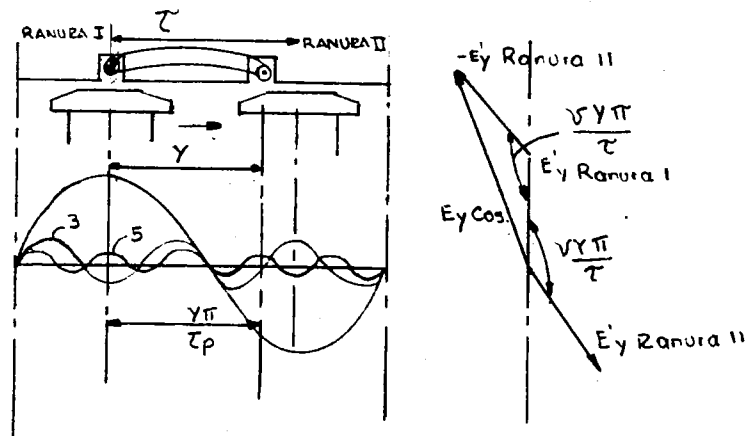


FIGURA 21. F.e.m. de una espira de paso  $Y_n$   $T_p$

De acuerdo con lo visto:

$$E_{\nu \text{ esp}} = 2 E_Y \quad \text{con Sen } \frac{\nu Y_n \pi}{2 T_p}$$

$$E_{\nu \text{ esp}} = 2 E_Y \quad \text{con } k_Y$$

de donde el factor de reducción para cualquier armónico es:

$$k_Y \nu = \text{Sen } \frac{\nu Y_n \pi}{2 T_p}$$

donde:

$\frac{Y_n}{T_p}$  es el paso de bobina

$Y_n$  es el paso de bobina medio, que en nuestro caso corresponde al ancho de la bobina estática.

$$Y_n = 15 \text{ mm} + 50 \text{ mm} + 15 \text{ mm} = 80 \text{ mm}$$

$$\text{El paso relativo de bobina } \frac{Y_n}{T_p} = \frac{80}{120} = 0.666$$

El factor de reducción o acortamiento para el primer armónico o fundamental es:

$$k_y = \text{Sen } \frac{80 \times}{2 \times 120}$$

$$k_y = 0,866$$

El factor de distribución " $k_d$ " es el que tiene en cuenta que las partes activas de una bobina están repartidas en más de una ranura y establece la relación entre la suma geométrica de las f.e.m. del devanado repartido y la f.e.m. del devanado concentrado.

Con un mismo número de espiras; para cualquier armónico esto es:

$$k_d = \frac{E_{QV}}{\eta_{Pf} E_{bob}} = \frac{E_{bob} \text{ Sen } \frac{Y_n \eta_{Pf} \gamma}{2}}{\eta_{Pf} E_{bob} \text{ Sen } \frac{\gamma \gamma}{2}}$$

$$k_d = \frac{\sin \left( \frac{V \eta_{Pf} \gamma}{2} \right)}{\eta_{Pf} \sin \frac{\gamma}{2}}$$

donde  $\gamma$  es el ángulo entre dos ranuras contiguas

$$\gamma = \frac{\pi}{m \eta_{Pf}} = \frac{\pi}{3n_{Pf}}$$

Sustituyendo tenemos:

$$k_d = \frac{\sin \left( \frac{\gamma \pi}{6} \right)}{n_{Pf} \sin \left( \frac{\gamma \pi}{6n_{Pf}} \right)}$$

El factor de distribución para el primer armónico o el fundamental es:

$$k_d = \frac{\sin \left( \frac{\pi}{6} \right)}{1 \sin \left( \frac{\pi}{6} \right)} = 1$$

$$k_d = 1$$

Entonces el coeficiente de bobinado para el primer armónico viene a ser:

$$k_1 = k_y \times k_d$$

$$k_1 = 0.866 \times 1$$

$$k_1 = 0.866$$

#### 6.4 ARROLLAMIENTO INDUCIDO

Debido al hecho de ser una máquina didáctica para ilustrar el principio de generación, el devanado será concentrado siendo el número de ranuras por polo y por fase igual  $N_{pf} = 1$ . En la onda de tensión generada estarán presentes los armónicos impares de orden superior.

#### 6.5 FEM DE UNA MAQUINA DE CORRIENTE ALTERNA

El valor medio de la f.e.m. inducida en una espira de paso diametral, independiente de la forma espacial o de la variación temporal de la onda de flujo alterno es:

$$e = \frac{2 \hat{\phi}_s}{T/2} \quad (\text{V medios/espira})$$

$\hat{\phi}_s$  = flujo máximo o total en el entrehierro por polo en wb

$2\hat{\phi}_s$  = variación del flujo entre un máximo positivo y un máximo negativo durante el tiempo  $T/2$  segundo de un semiperiodo

Si  $f$  (Hz) es la frecuencia del flujo alterno, o sea el número de



períodos por segundo, se tiene:

$$T = \frac{1}{f} \text{ (seg )}$$

y resulta para la espira citada

$$\bar{e} = 4 f \hat{\phi}_s \quad (\text{V medios/espira})$$

En cada fase del arrollamiento existen  $N_f$  espacios por fase y la f. e.m. media inducida por fase, independiente de la forma del campo magnético en el entrehierro, vendrá dada por:

$$\bar{E} = 4 f \hat{\phi}_s \quad (\text{V medios/fase})$$

Si el devanado no hubiera sido concentrado, es decir, si el número de ranuras por polo y fase fuera mayor que 1, la distribución de las bobinas provoca un cierto desfase entre los valores instantáneos de la f.e.m. en las espiras de distintas ranuras; la resultante de las varias ondas de f.e.m. idénticas pero desfasadas da un valor medio siempre inferior, al de las mismas ondas superpuestas por lo cual hay que afectar a  $\bar{E}$  de un cierto coeficiente de distribución  $k_d < 1$

$$\bar{E} = 4 f \hat{\phi}_s k_d N_f \quad (\text{V medios/fase})$$

Pero si además el paso de bobina  $Y_n$  no es diametral, el acortamiento produce un desfase adicional entre las f.e.m. de los conductores de ida y de vuelta en cada espira, lo que hace necesario introducir un nuevo factor de acortamiento  $k_p$  y, llegándose así a la expresión por fase

$$\bar{E} = 4 f \hat{\phi}_s N_f k_p k_d k_y \quad (\text{V medios/fase})$$

Como las magnitudes que más interesan en el tratamiento de las corrientes alternas son los valores eficaces, pasaremos de la expresión de valor medio  $\bar{E}$  a aquel otro, eficaz,  $E$  multiplicado por el factor de forma  $K_f$ , por definición

$$K_f = \frac{\text{Valor eficaz}}{\text{Valor medio}} = \frac{\sqrt{\frac{\int_0^T e^2 dt}{T}}}{\frac{\int_0^T e dt}{T/2}}$$

Con lo cual

$$E = 4 K_f \cdot f \hat{\phi}_s N_f k_p k_d k_y \quad (\text{V eficaces/fase})$$

Poniendo el número de espiras por fase  $N_f$  en función del número

total de conductores  $Z$  del inducido y del número de fases  $m$  de la máquina

$$N_f = \frac{Z/2}{m} \quad \text{entonces,}$$

$$E = 2 K_f \times f \times \hat{\phi} \times \frac{Z}{m} \quad (\text{V/fase})$$

El producto  $(Z \times \frac{Z}{m})$  del número de conductores físicos por el factor de bobinado se lo representa también por  $Z$  bajo el nombre de "conductores efectivos".

$$E = 2 K_f \times f \times \hat{\phi} \times \frac{Z}{m} \quad (\text{V/fase})$$

De la Figura 22 teniendo en cuenta el recubrimiento polar  $\psi = 0.66$  se obtiene el factor relativo de forma  $K_f$  para alternadores de polos salientes y entrehierro uniforme.

El factor de forma con entrehierro uniforme vale:

$$K_f = 0.98$$

Entonces la f.e.m. por fase es:

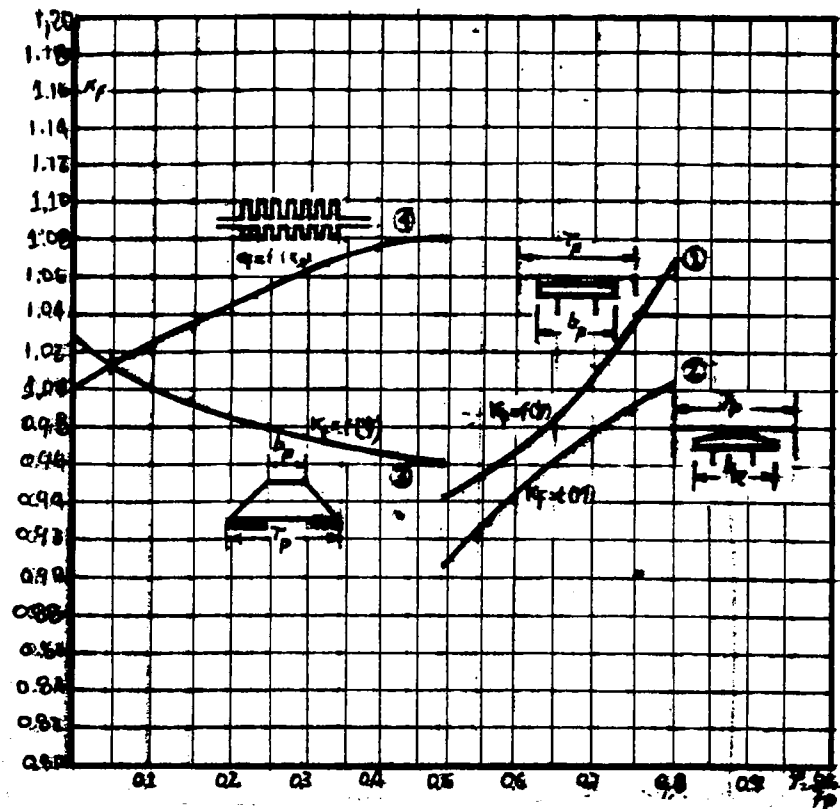


FIGURA 22. Factor relativo de forma  $K_f$  para diversos tipos de sistemas polares

1. Alternadores de polos salientes y entrehierro uniforme
2. Alternadores de polos salientes y entrehierro senoidal
3. Alternadores de inductor cilíndrico
4. Motores de inducción

$$E = 2 \times 0.98 \times f \times \hat{\phi}_\delta \frac{Z \ell}{m} \quad \text{despejando el flujo } \hat{\phi}_\delta$$

$$\hat{\phi}_\delta = \frac{m \times E}{1.96 \times f \times Z \ell} \quad (\text{wb})$$

$$\hat{\theta} = \frac{m \times E}{1.96 \times f \times Z} \times 10^8 \quad (\text{Max})$$

## 6.6 NUMERO DE RANURAS POR POLO Y POR FASE

El número de ranuras por polo y por fase depende del acortamiento y distribución que se haya efectuado en el devanado.

En nuestro diseño el número de ranuras por polo y por fase  $N_{pf}$  que satisface esta afirmación es 1

$$N_{pf} = 1$$

El valor adoptado de " $N_{pf}$ " nos da un número total de ranuras de

$$N = (2p_m) N_{pf} = 4 \times 3 \times 1 = 12$$

$$N = 12$$

## 6.7 INDUCCION EN EL ENTREHIERRO EN VACIO

La inducción es un parámetro determinante en las condiciones del circuito magnético, el nivel de saturación, la forma de la onda de la f.e.m., la regulación y la cantidad de excitación.

Ya que se trata de una máquina de pequeña potencia y la construcción se hará en piezas de acero fundido, se supondrá de momento un valor de la inducción en vacío.

Suponiendo un  $\hat{B}_{\delta 0} = 824 \text{ Gaus} = 0.0824 \text{ Teslas}$

Con este valor el número de conductores por ranura es:

$$Z_n = \frac{22.5 \text{ Vf}}{\left(\frac{f}{100}\right) \epsilon N_{pf} (D \cdot L) \hat{B}_{\delta 0}}$$

$$Z_n = \frac{22.5 \times 127}{\frac{60}{100} \times 0.866 \times 1 (20 \times 4) \times 0.0824} = \frac{2.857,5}{3,42} = 833,77$$

Adoptamos:  $Z_n = 834$

Conductores totales  $Z = NZ_n = 12 \times 834 = 10008$

Como analizamos anteriormente,

$$\hat{\phi}_{\delta 0} = \frac{m \times E}{1,96 \times f \times Z \times \epsilon} = \frac{3 \times 127 \text{ V}}{1,94 \times 60 \times 10008 \times 0,866} = \frac{381}{1019230,733}$$

$$\hat{\phi}_{\delta 0} = 3,7381 \times 10^{-4} \text{ weber}$$

Como el factor de bobinado en nuestro caso es igual a 0,866 conserva mayor importancia el número de espiras por fase  $N_f$ , entonces la ecuación del voltaje eficaz por fase es:

$$E = 4 \times K_f \times f \times \hat{B}_f \times N_f \quad (V \text{ eficaz/fase})$$

Para el cálculo, no se admite una ecuación senoidal

$K_f = 0,98$  y entonces

$$E = 3,88 \times f \times \hat{B}_f \times N_f \quad (V \text{ eficaz/fase})$$

De donde:

$$N_f = \frac{E}{3,88 \times f \times \hat{B}_f} = \frac{127}{3,88 \times 60 \times 3,776 \times 10^{-4} \times 0,866} = 1.685 \text{ espiras/fase}$$

$$N_f = 1.685 \text{ espiras/fase}$$

Además la corrección por  $Z_n$  nos da un valor de inducción definitivo.

$$\hat{B}_{f0} = \hat{B}_f \frac{Z_n \text{ Teórico}}{Z_n \text{ Adoptado}}$$

$$\hat{B}_{f0} = 0,0824 \times \frac{833.8}{834}$$

$$\hat{B}_{f0} = 0,08238 \text{ Teslas}$$

La carga lineal específica influye en el valor de las reactancias de dispersión, en la reacción de armadura y en el calentamiento; se

puede calcular mediante la fórmula:

$$q = \frac{Z \times I}{\pi D} = \frac{10008 \times 0,65}{\pi \times 20} = 103.53 \frac{A \times C}{cm}$$

$$q = 103.53 \frac{A \times C}{cm}$$

## 6.8 DIMENSIONES DE CONDUCTORES Y POLOS ESTATORICOS

### 6.8.1 Conductores

La selección de los conductores está determinada por la densidad de la corriente " $\Delta$ ", que se asume de acuerdo con la experiencia. Depende del tipo de ventilación, la velocidad periférica y los aislamientos.

En general un valor de 4 A/mm<sup>2</sup> es bueno para máquinas como la que nos ocupa.

Los parámetros " $\Delta$ " y "q" aisladamente tienen influencia sobre el comportamiento electromagnético de la máquina, pero su producto es decisivo por sus efectos en el calentamiento de los bobinados.

$$q = \frac{Z \times I}{\pi \times D} \left( \frac{A \times C}{cm} \right) \quad \Delta = \frac{I}{S} \left( \frac{A}{mm} \right)$$



$$q \times \Delta = \frac{Z \times I^2}{\pi \cdot D \cdot S} \cdot \frac{A \times C}{\text{cm}} \times \frac{A}{\text{mm}^2}$$

Definidos estos parámetros podemos calcular sin riesgos la sección del conductor "S" por fase

$$S = \frac{I}{\Delta} = \frac{0,65}{4} = 0,162 \text{ mm}^2$$

$$S = 0,162 \text{ mm}^2$$

0,162 mm<sup>2</sup> equivale a un alambre #25 o sea que es el calibre del conductor que debemos utilizar para el devanado del estator.

Calculada la sección del conductor, se procede a encontrar el producto  $q \cdot \Delta$

$$q \cdot \Delta = \frac{Z \cdot I^2}{\pi \cdot D \cdot S} = \frac{10.008 \times (0.65)^2}{\pi \times 20 \times 0.162} = 415.4$$

$$q \cdot \Delta = 415,4 \cdot \frac{A \times C}{\text{cm}} \times \frac{A}{\text{mm}^2}$$

Otra forma de encontrar el producto  $q \cdot \Delta$  es multiplicando sus respectivos valores

$$q \cdot \Delta = 103.53 \cdot \frac{A \times C}{\text{cm}} \times 4 \cdot \frac{A}{\text{mm}^2}$$

$$q \cdot \Delta = 414.12 \left( \frac{A \times C}{\text{cm}} \times \frac{A}{\text{mm}^2} \right)$$

Adoptamos:

$$q \cdot \Delta = 415 \left( \frac{A \times C}{\text{cm}} \times \frac{A}{\text{mm}^2} \right)$$

Multiplicando y dividiendo por la longitud media de un conductor

"lm"

$$q \cdot \Delta = \frac{Z I^2 l_m}{D S l_m}$$

Tenemos que  $Z l_m$  es la longitud total del devanado de cada fase

" $L_t$ " expresado en mt y que  $\pi D l_m$  es la superficie cilíndrica del arrollamiento  $A_o$  expresado en dm<sup>2</sup> por tanto

$$q \cdot \Delta = \frac{L_t \cdot I^2}{S A_o} \left( \frac{A \times C}{\text{cm}} \times \frac{A}{\text{mm}^2} \right)$$

y sabemos que la resistencia óhmica del devanado  $R$  vale:

$$R = \rho \frac{L_t}{S}$$

Donde  $\rho$  es la resistividad dada en  $\frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$  y llegamos a que:

$$q \cdot \Delta = \frac{R I^2}{\rho A_o}$$

Ecuación que muestra el número de vatios por dm<sup>2</sup> que habrá de disipar el devanado, para eliminar pérdidas por efecto Joule.

La velocidad periférica de esta máquina "V" se puede obtener así:

$$V = \frac{\pi D N}{60} = \frac{\pi \times 0.20 \times 1.800}{60}$$

$$V = 18,85 \text{ m/seg}$$

#### 6.8.2 Polos estáticos

En el estator se ubicarán tres polos separados 120° donde se colocarán las bobinas por fase. Calculadas anteriormente. Por esta razón se tomó el número de ranura por polo y por fase  $U_{pf} = 1$ .

El grueso del polo está determinado por un factor de corrección lineal "K<sub>fe</sub>" que depende directamente de la relación entre la longitud del inducido y la longitud neta del hierro; y de la relación entre la inducción máxima senoidal  $\hat{B}_0$  y la inducción aparente " $\hat{B}_0 M_0$ " en vacío.

La longitud bruta del hierro es igual a la diferencia entre la longitud del estator y el producto del número de canales de ventilación  $n_c$  por el ancho del canal  $E_c$ .

$$L_h = L - n_c E_c$$

Como en nuestro diseño no se utilizan canales de ventilación ya que el inducido es corto, la longitud bruta del hierro es igual a la longitud bruta del estator.

$$L_h = L$$

$$L_h = 40 \text{ mm}$$

Por otra parte, la longitud neta del hierro  $L_{fe}$  es igual al producto del factor de apilamiento  $K_{fe}$  por la longitud bruta del hierro.

$$\text{Longitud neta del hierro } L_{fe} = K_{fe} \cdot L_h$$

En nuestro caso para polos macizos el factor de apilamiento  $K_{fe} = 1$

$$L_{fe} = L_h$$

$$L_{fe} = 40 \text{ mm}$$

Con esto tenemos que el factor de corrección axial para los polos del estator es:

$$K_{fe} = \frac{L}{L_{fe}} = \frac{40}{40} \cong 1$$

$$K_{fe} = 1$$

De la bibliografía de diseño asumimos una inducción en el polo

$$\hat{B}_\delta M_o = 0.0215 \text{ Teslas}$$

El grueso del polo "to" será:

$$t_o = K_{fe} \tau_\delta \frac{\hat{B}_\delta o}{\hat{B}'_\delta M_o}$$

$\tau_\delta$  es el paso de ranura y se calcula por la siguiente fórmula:

$$\tau_\delta = \frac{\pi D}{n} = \frac{\pi \times 200}{12}$$

$$\tau_\delta = 5,23 \text{ mm}$$

Por lo tanto

$$t_o = 1 \times 5,23 \times \frac{0,0824}{0,0215}$$

$$t_o = 20,0 \text{ mm}$$

Como se trata de dientes rectangulares y uniformes, este grueso es constante a cualquier altura del mismo.

### 6.8.3 Cálculo de resistencia óhmica

Para el cálculo de la resistencia óhmica es necesario asumir la bobina con 64 espiras por capa, encontrando así la longitud total de la bobina ( L.T.B. )

$$N = \text{espiras/capa} = \frac{\text{Longitud bobina ( L.T.B. )}}{\phi \text{ conductor} \times 1,1}$$

$$L.T.B. = N: \text{espiras/capa} \times \phi \text{ conductor} \times 1,1$$

$$L.T.B. = 64 \times 0,455 \times 1,1$$

$$L.T.B. = 31,53 \text{ mm}$$

El número de capas es:

$$N_c = \frac{N \text{ espiras}}{N \text{ espiras/capa}} = \frac{1,668}{64} = 26$$

$$N_c = 26 \text{ capas}$$

El espacio ocupado por las 26 capas es:

$$\text{Espacio ocupado} = \phi_{cu} \times N_c \times 1,1$$

$$\text{Espacio ocupado} = 0,455 \times 26 \times 1,1$$

$$\text{Espacio ocupado} = 13,01 \text{ mm}$$

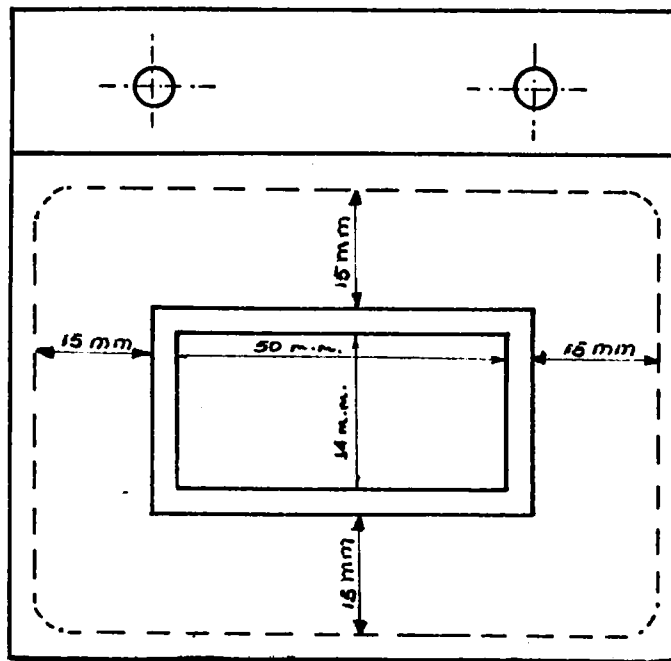


FIGURA 23. Dimensiones de las bobinas estáticas

Longitud de la espira mínima

$$l_{\min p} = 2 ( 14 + 8 + 2 + 50 + 8 + 2 ) \text{ mm}$$

$$l_{\min p} = 2 ( 84 )$$

$$l_{\min p} = 168 \text{ mm}$$

Longitud de la espira máxima

$$l_{\max} = 2 ( 14 + 8 + 2 + 15 + 50 + 8 + 2 + 15 ) \text{ mm}$$

$$l_{\max} = 2 ( 114 ) \text{ mm}$$

$$l_{max} = 228 \text{ mm}$$

Longitud de la espira media:

$$l_{mp} = \frac{l_{mp} + l_{max}}{2}$$

$$l_{mp} = \frac{168 + 228}{2} = 198 \text{ mm}$$

$$l_{mp} = 198 \text{ mm}$$

La resistencia media por bobina estat6rica es:

$$R_{bE} = \frac{\rho_{cu} l_{mp}}{S} \times N_f$$

$$R_{bE} = \frac{0.0172 \times 0.198}{0.162} \times 1.668 = 35$$

$$R_{bE} = 35$$

#### 6.8.4 Altura del diente o n6cleo estat6rico "ht"

Para calcular la altura del diente o n6cleo estat6rico "ht" se debe tener en cuenta el espacio necesario para la formaleta; como 6sta se construir6 en acr6lico de 4mm de espesor con el objetivo de que quede did6ctico, entonces se le a6adir6 este valor a cada extremo.



$$ht = L.T.B. + 4 + 4$$

$$ht = 31.53 + 8$$

$$ht = 39.53 \text{ mm}$$

Adoptamos  $ht = 40 \text{ mm}$

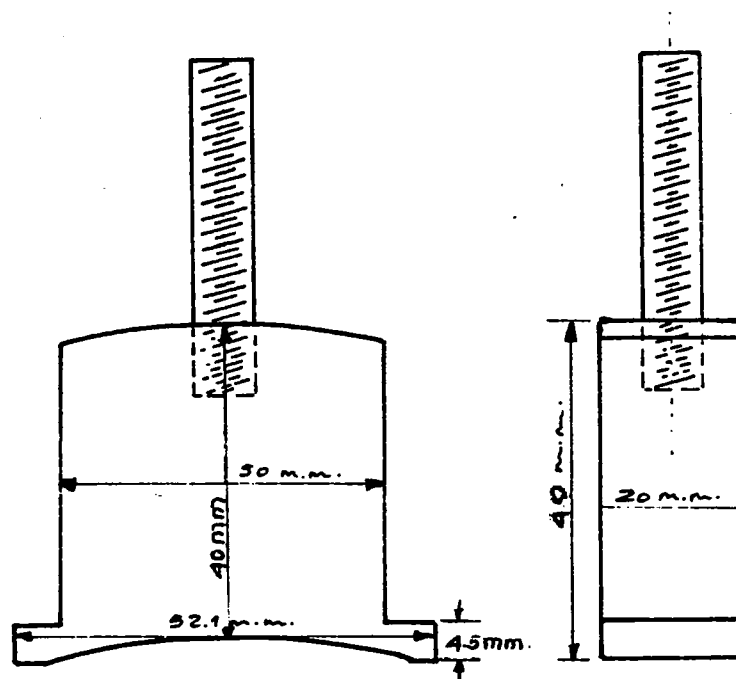


FIGURA 24. Dimensiones de un polo estático

La inducción aparente en cualquier altura del diente es la misma, ya que se trata de dientes rectangulares y uniformes. Por lo tanto la inducción en el diente

$$\hat{B}_{dmo} = \hat{B}_{\delta} mo = 0.0215 \text{ Teslas}$$

$$\hat{B}_{dmo} = 0.0215 \text{ Teslas}$$

## 6.9 CALCULO DEL YUGO

El primer problema es adoptar una inducción en vacío  $\hat{B}_{yo}$  en la sección de máximo flujo, esta dependerá de la calidad del acero usado y de las frecuencias de las alteraciones de flujo. Teniendo en cuenta que el material utilizado es macizo y de baja calidad, el valor recomendado es:

$$\hat{B}_{yo} = 0.0824 \text{ Teslas}$$

La altura del yugo  $h_y$  obedece a la fórmula:

$$h_y = \left( \frac{K_f K_{fe}}{2} \right) \left( \frac{D}{P} \right) \left( \frac{\hat{B}_o}{\hat{B}_{yo}} \right)$$

Donde  $K_f$  es el llamado factor relativo de forma, que depende de la forma del entrehierro y del coeficiente de recubrimiento polar.

$$K_f = 0.98$$

Con este valor podemos calcular la altura del yugo.

$$h_y = \left( \frac{0.98 \times 1}{2} \right) \left( \frac{20}{2} \right) \left( \frac{0.0824}{0.0824} \right)$$

$$h_y = 4.9 \text{ cm}$$

Adoptamos 5 cm = 50 mm

Corrigiendo la inducción resultante en vacío, queda como sigue:

$$\hat{B}_{y0} = 0.0824 \times \frac{49}{50}$$

$$\hat{B}_{y0} = 0.08075 \text{ Teslas}$$

Consecuentemente, otras medidas del yugo son:

Diámetro medio:

$$D_{ym} = D_M + h_y$$

$$D_{ym} = 280 + 50$$

$$D_{ym} = 330 \text{ mm}$$

Diámetro exterior:

$$D_{yM} = D_{ym} + h_y$$

$$D_{yM} = 330 + 50$$

$$D_{yM} = 380$$

Longitud media de la línea de fuerza:

$$l_y = \frac{\widetilde{I} D_{ym}}{4P} = \frac{\widetilde{I} \times 380}{4 \times 2} = 149,22 \text{ mm}$$

## 7. CALCULOS DEL ROTOR

### 7.1 NUCLEO

Para efectuar los cálculos es necesario asumir una densidad de flujo en los polos, la cual debe ser baja en nuestro caso por tratarse de una máquina de pequeña potencia.

La inducción asumida en los polos en vacío  $B_{po} = 0.61$  Teslas.

#### 7.1.1 Coeficiente de dispersión polar

Debe ser determinado ahora el coeficiente de dispersion polar en vacío para el cual la bibliografía de diseño sugiere una variación de 1.10 a 1.25.

Teniendo en cuenta el promedio de los valores sugeridos asumimos para el coeficiente de dispersión en vacío  $\sigma_{po} = 1.20$

El coeficiente de dispersión polar (  $\sigma_{po}$  ) es la relación entre el flujo por núcleo y el flujo en el entrehierro ( 20 )

#### 7.1.2 Factor de aplilamiento

Asumimos el valor del factor de apilamiento de los polos observando que éste oscila desde 0.9 para los polos laminados hasta 1.0 para los macizos, por tratarse de los últimos.  $K_{fe} = 1.0$

#### 7.1.3 Longitud del núcleo polar

La longitud del núcleo polar debe ser igual o menor que la longitud del inducido; según referencia ( 21 ) "si se hace mayor, garantiza que no hay empuje magnético axial, lo cual somete al material a esfuerzos innecesarios".  $L_{np} = 20 \text{ mm}$

Por el acortamiento que puede presentarse debido al factor de apilamiento y a la longitud del núcleo polar, necesitamos definir un coeficiente longitudinal del polo  $K_p$ .

---

( 20 ) CORRALES MARTIN, op. cit., p.184

( 21 ) Ibid., p.209 - 210

$$K_p = \frac{L}{K_{fe} L_{np}} = \frac{40}{1 \times 20} = 2.0$$

$$K_p = 2.0$$

$K_p$  es el coeficiente de utilización o longitudinal del polo que permite un fácil asiento frontal de las bobinas conductoras. Este coeficiente es directamente proporcional a la longitud axial del inducido e inversamente proporcional al producto del factor de apilamiento y la longitud del núcleo polar (22).

#### 7.1.4 Ancho del núcleo polar

El ancho del polo " $b_{np}$ " está definido por:

$$b_{np} = \frac{(K_f \cdot K_p) D}{P} \frac{(\sigma_{po} \cdot \hat{B} \sigma_o)}{B_{po}}$$

$$b_{np} = \frac{(1 \times 2) 200}{2} \frac{(1.20 \times 0.08238)}{0.61}$$

$$b_{np} = 32.41 \text{ mm}$$

Se adopta un " $b_{np}$ " = 33 mm. Entonces se corrige el  $b_{po}$  con el valor asumido.

---

(22) Ibid., p.209

$$B_{po} = 0.61 \times \frac{32.41}{33}$$

$$B_{po} = 0.599 \text{ Teslas}$$

## 7.2 CALCULO DE LA CONFIGURACION COSENOIDAL EN EL ENTREHIERRO

El objetivo de este cálculo es lograr conformar la zapata polar con la cual se pueda lograr obtener una onda de campo que se aproxime a la forma senoidal.

Una solución aproximada a la real es lograda haciendo variar el entrehierro desde el centro del polo " $\delta$ " hasta el extremo de la expansión utilizando una ley cosenoidal.

### 7.2.1 Valores del entrehierro

El valor del entrehierro " $\delta_x$ " en cada punto podemos calcularlo como sigue:

$$\delta_x = \frac{\delta}{\cos \alpha m}$$

Se tendrá en cuenta que el ángulo está dado en grados eléctricos.

En la Figura 25 se observan los símbolos de cada una de las dimen



siones del polo para un entrehierro cosenoidal.

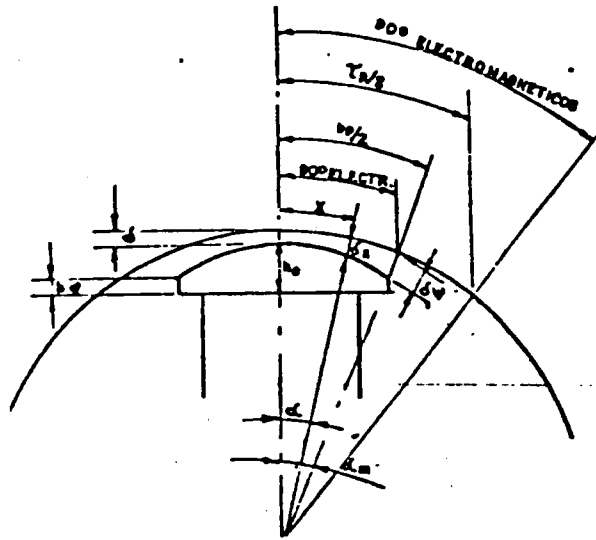


FIGURA 25 . Entrehierro cosenoidal

Primero se determina " $\alpha_m$ " en grados eléctricos.

$$\alpha_m = \frac{360^\circ}{2p} \times \frac{\Psi}{2}$$

$\alpha_m$  = es el máximo ángulo que hay desde el centro del polo en su parte inferior, hasta uno de los extremos de la zapata polar.

$\Psi$  es la relación del arco polar y paso polar y se puede obtener en función de  $K_m$  mediante la fórmula:

$$\Psi = 9.73 K_m^2 - 21.62 K_m + 12.55 \quad (0.5 < \Psi < 0.8)$$

Como  $K_m = 1$ , entonces  $\Psi = 0.66$

Reemplazando los valores correspondientes para hallar  $\alpha_m$

$$\alpha_m = \frac{360^\circ}{4} \times \frac{0.66}{2}$$

$$m = 29.7^\circ$$

Ahora se verá cuál es el valor equivalente en grados eléctricos para hacer el reemplazo en la fórmula correspondiente. Grados eléctricos = grados geométricos x número de pares de polos.

$$\alpha_m \text{ eléctricos} = 29.7^\circ \times 2$$

$$\alpha_m \text{ eléctricos} = 59.4^\circ \text{ eléctricos}$$

Con este valor y teniendo en cuenta que el entrehierro mínimo es de 1 mm, se tabulan los valores para conformar la zapata polar.

TABLA 3 . Cálculo del entrehierro cosenoidal

$\alpha^\circ \text{ Eléc.}$	5	10	15	20	25	30
$\cos \alpha$	0.9961	0.9848	0.9659	0.9396	0.9063	0.8660
$\int x$	1.00	1.015	1.035	1.064	1.103	1.154
$\alpha^\circ \text{ Eléc.}$	35	40	45	50	55	59.4
$\cos \alpha$	0.8191	0.7660	0.7071	0.6427	0.5735	0.5090
$\int x$	1.220	1.305	1.4142	1.555	1.743	1.964

De la Tabla 3 se observa que el entrehierro máximo es:

$$\delta_{\max} = 1.964 \text{ mm}$$

Este entrehierro coincide con el rango de valores dado para máquinas sincrónicas que es de:

$$\delta_{\max} = 1.5 \text{ a } 2.25 \text{ veces el entrehierro mínimo}$$

Por razones constructivas se adoptó un entrehierro uniforme de 1.0 mm como se muestra en la Figura 26.

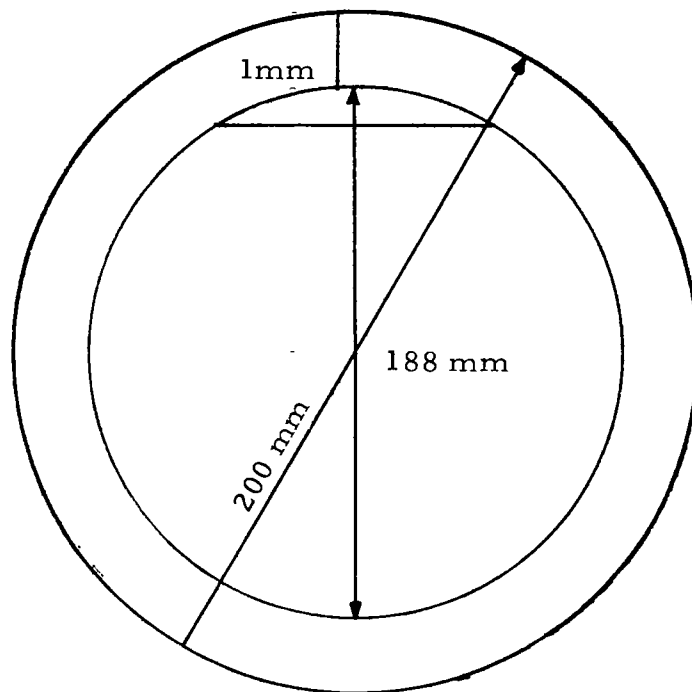


FIGURA 26 . Entrehierro uniforme de 1.0 mm

### 7.3 BOBINAS POLARES

#### 7.3.1 Cálculo de la altura de la bobina polar (provisional)

$$h_{bp} = \frac{q \cdot \tau}{700 \sqrt{0.3 + 0.1 V}} \text{ cm}$$

Esta fórmula está basada en otras máquinas que han sido construidas teniendo en cuenta las condiciones normales del circuito magnético, de reacción de armadura y de ventilación. Recordando que:

$$q = \text{carga lineal específica} = 103.53 \frac{\text{Amp. Conduct}}{\text{Cm}}$$

$$\tau = \text{paso polar} = 15.5 \text{ cm}$$

$$V = \text{velocidad periférica en m/seg} = 18.85 \text{ m/seg}$$

$$h_{bp} = \frac{103.53 \times 15.5}{700 \sqrt{0.3 + 0.1 (18.85)}}$$

$$h_{bp} = 1.55 \text{ cm}$$

#### 7.3.2 Altura radial del núcleo polar

Dada la importante fuerza centrífuga que han de soportar las bobinas de esta máquina, el espacio necesario para aislamientos que consideramos de 0.8 cm y los refuerzos con que habrá que contar en las cabezas libres, dejaremos en total 4,8 cm de altura del núcleo.

$$hnp = hbp + 5 \text{ cm}$$

$$hnp = 1.55 + 5 \text{ cm}$$

$$hnp = 6.55 \text{ cm}$$

$$\text{Adoptamos } hnp = 6.4 \text{ cm}$$

La longitud total de cada polo es la suma de la altura radial del núcleo polar y el valor de la altura de la expansión polar en el centro del polo " $h_o$ " ( cm ). En nuestro caso  $h_o = 0.8 \text{ cm}$

$$hp = hnp + h_o$$

$$hp = 6.4 + 0.8$$

$$hp = 7.2 \text{ cm}$$

### 7.3.3 Definición de la corona polar

La corona polar es la parte de la máquina donde se alojan los polos rotóricos. Como se ha definido completamente el polo, se puede ahora obtener el diámetro máximo de la corona polar.

$$D_{nm} = D - 2 ( \rho + hp )$$

$$D_{nm} = 20 - 2 ( 0.1 + 7.2 )$$

$$D_{nm} = 5.4 \text{ cm}$$

Se considera ahora la inducción admisible en vacío en el núcleo polar con un valor de "0.07 Teslas" y un factor de apilamiento igual a 1, debido a que tendremos un núcleo polar macizo.

La longitud axial bruta de la corona es igual al ancho del núcleo polar.  $L_n = L_p - N_c$

Como no existen canales de ventilación, entonces  $L_n = L_p$

$$L_n = L_p = 40 \text{ mm}$$

Con los valores anteriores se obtiene el coeficiente longitudinal del núcleo.

$$K_n = \frac{L_p}{K_{fe} L_n}$$

$$K_n = \frac{4}{1 \times 4}$$

$$K_n = 1$$

La altura del núcleo teniendo el coeficiente longitudinal es:

$$h_n = \left( \frac{K_f K_n}{2} \right) \frac{D}{P} \left( \frac{\hat{J}_{po} B_{do}}{B_{no}} \right)$$

$$h_n = \left( \frac{0.98 \times 1}{2} \right) \frac{20}{2} \left( \frac{1.2 \times 0.08238}{0.07} \right)$$

122

$$h_n = 6.92 \text{ cm}$$

Se adopta un valor de  $h_n = 7.1 \text{ cm}$  el cual deberá ser revisado con respecto a los esfuerzos mecánicos que deberá soportar.

#### 7.4 DIMENSIONES COMPLEMENTARIAS

La inducción provisional que se tendrá en vacío será:

$$B_{no} = 0.07 \frac{7.06}{7.1}$$

$$B_{no} = 0.0696 \text{ Teslas}$$

La longitud media de las líneas de fuerza en la corona polar la obtenemos como sigue:

$$l_n = \frac{\pi \times D_{nm}}{4 \times p}$$

$$l_n = \frac{\pi \times 5.4}{4 \times 2}$$

$$l_n = 2.12 \text{ cm}$$

En la Figura 27 se muestran todas las dimensiones que definen completamente el polo.

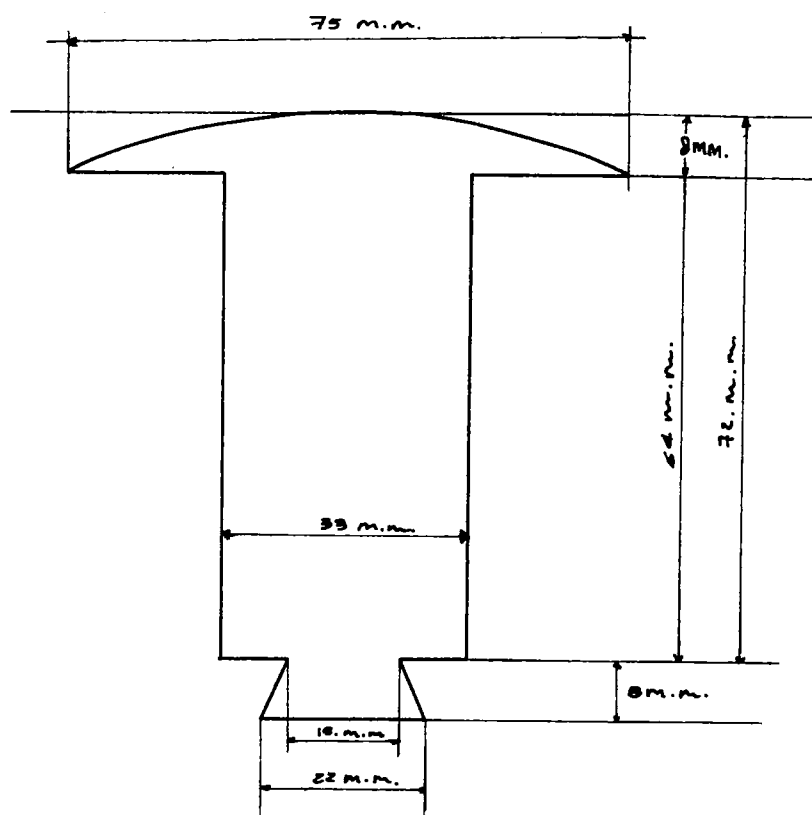


FIGURA 27 . Dimensiones de un polo rotórico



## 8. EXCITACION EN VACIO

### 8.1 ENTREHIERRO

La inducción en el entrehierro se obtiene teniendo en cuenta las correcciones necesarias debidas a: la forma de la zapata polar, el recubrimiento polar, los canales de ventilación radial, el coeficiente de carter, los cuales se tienen en cuenta con los factores  $K_M$ ,  $K_L$ ,  $K_C$ , entonces

$$\hat{B}_\delta = K_M K_L K_C \hat{B}_{\delta_0}$$

$K_L$  = es el coeficiente de corrección para el entrehierro y en nuestro caso vale 1, porque no tenemos canales de ventilación radial.

$$K_L = \frac{L}{L_h} = \frac{40 \text{ mm}}{40 \text{ mm}} = 1$$

$K_C$  = es el coeficiente de carter, para representar el aumento de

la inducción máxima en el entrehierro debida a la discontinuidad que las ranuras producen en el arco polar reduciendo la superficie útil del entrehierro. En nuestro caso  $K_C = 1$  porque el número de ranuras por polo es igual a 1.

$$K_C = 1$$

$K_M$  = es el factor absoluto de amplitud para la onda real de inducción que depende de las características del entrehierro y el coeficiente de recubrimiento polar  $\psi$ . La Figura 28 muestra el factor relativo de amplitud para diferentes máquinas como:

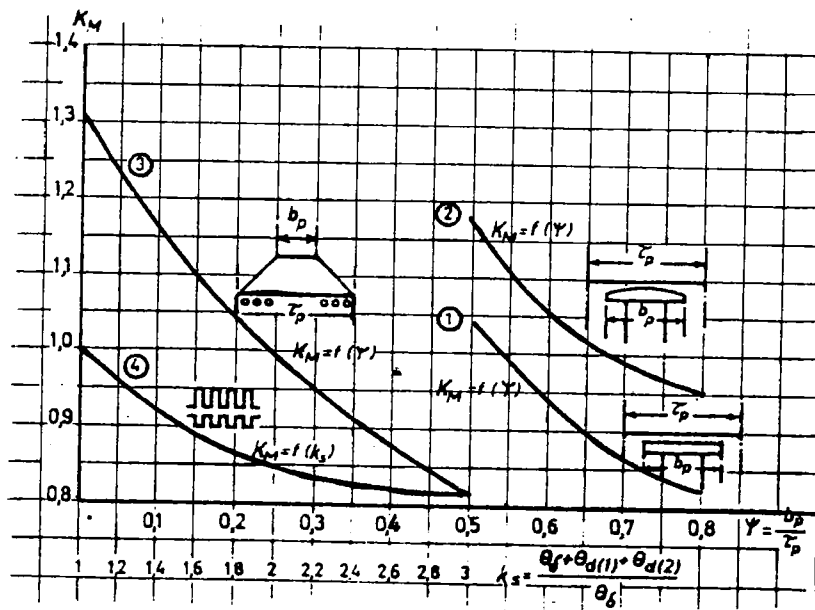


FIGURA 28 . Factor relativo de amplitud para máquinas de corriente alterna

1. Alternadores de polos salientes y entrehierro uniforme
2. Alternadores de polos salientes y entrehierro senoidal
3. Alternadores de inductor cilíndrico
4. Motores de inducción ( estator y rotor ranurados )

En nuestro caso la máquina es de polos salientes y entrehierro senoidal, ya que la zapata polar es mayor que la zapata estatórica; por lo tanto nos ubicamos en la curva 2. Figura 28.

Para un valor de recubrimiento polar  $\psi = 0.66$  el factor absoluto de amplitud  $K_M = 1.01$

$$K_M = 1.01$$

Ahora calculamos la inducción máxima en el entrehierro

$$\hat{B}_\delta = ( 1.01 ) ( 1.0 ) ( 1.0 ) ( 0.08238 )$$

$$\hat{B}_\delta = 0.0832 \text{ Teslas}$$

Como se está calculando en la zona del entrehierro y hay una inducción máxima efectiva  $\hat{B}_\delta$  se puede calcular la inducción magnética y luego el flujo en el entrehierro.

$$\hat{H}_\delta = \frac{1}{4 \times 10^{-7}} \hat{B}_\delta \quad \text{Teniendo } \hat{B}_\delta \text{ en teslas}$$

$$\hat{H}_\delta = 800.000 \ B_\delta \frac{A \cdot V}{m}$$

$$\hat{H}_\delta = 0.8 \times \hat{B}_\delta \text{ Teniendo } \hat{B}_\delta \text{ en gauss}$$

$$\hat{H}_\delta = 0.8 \times (832) \frac{A \cdot V}{cm}$$

$$\hat{H}_\delta = 665,6 \frac{A \cdot V}{cm}$$

Con el entrehierro mínimo y con la inducción es posible calcular la fuerza magnetomotriz

$$\hat{\Theta}_{\delta_0} = \hat{H}_\delta \delta$$

$$\hat{\Theta}_{\delta_0} = 665,6 (0.1)$$

$$\hat{\Theta}_{\delta_0} = 66,56 \frac{A \cdot V}{\text{polo}}$$

## 8.2 DIENTES

Se debe calcular ahora la inducción real corregida en el diente y además la intensidad de campo. Se explica ahora el método a seguir:

Debe partirse de la característica magnética del hierro  $B = f(H)$ , teniendo  $B$  en teslas o gauss y  $H$  en  $\frac{A \cdot V}{cm}$ . A continuación se trazan una serie de rectas que pasen por el origen del gráfico con la siguiente ecuación:

$$Y = -1.25 H Kt$$

Tomando varios valores de  $K_t$  como parámetro.

Esta corrección se debe a que cuando la inducción en los dientes se eleva por encima de 1,8 teslas se presenta alguna desviación del flujo que va por los dientes entrando en la ranura y disminuyéndose entonces la inducción efectiva en los dientes.

Si la inducción no sobrepasa 1.8 teslas entonces se supondrá que el flujo pasa por los dientes en forma paralela con las ranuras. El valor de  $K_t$  se determina como sigue:

$$K_t = K_{Fe} \frac{\tau_d}{t_o} - 1$$

Siendo " $\tau_d$ " el paso de diente y  $t_o$  el grueso del diente que en nuestro caso corresponde al grueso del polo.

A continuación se deben trazar rectas con diferente " $K_t$ " que pasen por el origen de coordenadas de la gráfica  $B$  ( $\text{wb/m}^2$ ) contra  $H$  ( $\text{A/m}$ ) y luego sobre este gráfico se efectúan las lecturas.

La Figura 29 ilustra a manera de ejemplo el procedimiento a seguir en estos casos.

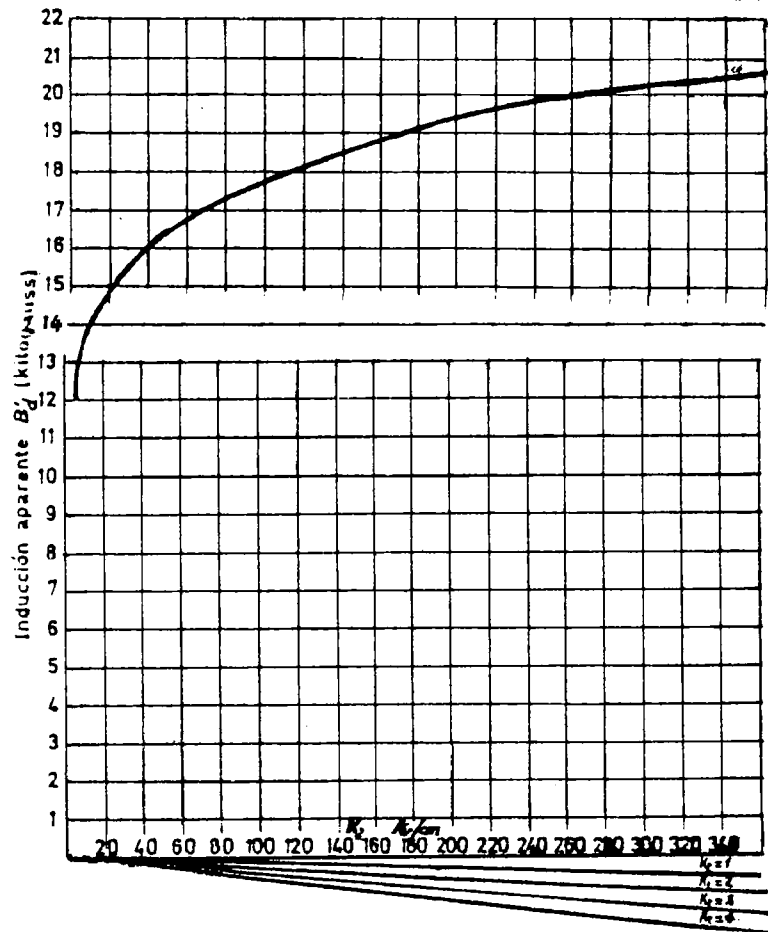


FIGURA 29 . Ejemplo de una curva con varios factores  $K_t$  para el cálculo del campo en los dientes

Como en nuestro proyecto los dientes o polos son de grueso tangencial uniforme la inducción máxima aparente se obtendrá por la siguiente ecuación:

$$\hat{B}'_{d_0} = (K_M \hat{B}_{s_0}) \frac{\gamma_e}{t_0} \frac{L}{L_F \cdot e}$$

$$\hat{B}'_{d_0} = ( 1.01 ) ( 0.08238 ) ( \frac{5.23}{20} ) ( \frac{40}{40} )$$

$$\hat{B}'_{d_0} = 0.02175 \text{ teslas}$$

Analizando el valor obtenido de inducción en los dientes se encuentra que no sobrepasa los 1.8 teslas; por lo tanto no se hace necesario efectuar correcciones por desviaciones de flujo dentro de los dientes.

De la curva característica del material, se obtiene el valor del campo "H".

$${}^{\prime\prime}H^{\prime\prime}_{d_0} = 0,11 \frac{A \cdot V}{cm}$$

La excitación necesaria para los dientes será de:

$$\hat{\Theta}_{d_0} = \hat{H}_{d_0} \times ht \frac{A \cdot V}{polo}$$

$$\hat{\Theta}_{d_0} = 0.11 \times 4$$

$$\hat{\Theta}_{d_0} = 0.44 \frac{A \cdot V}{polo}$$

### 8.3 YUGO

Para el yugo se tenía una inducción efectiva en vacío de  $\hat{B}_{y_0} = 0.0824$  teslas. La Figura 30 muestra la característica magnética del acero

fundido utilizado en la construcción del alternador didáctico.

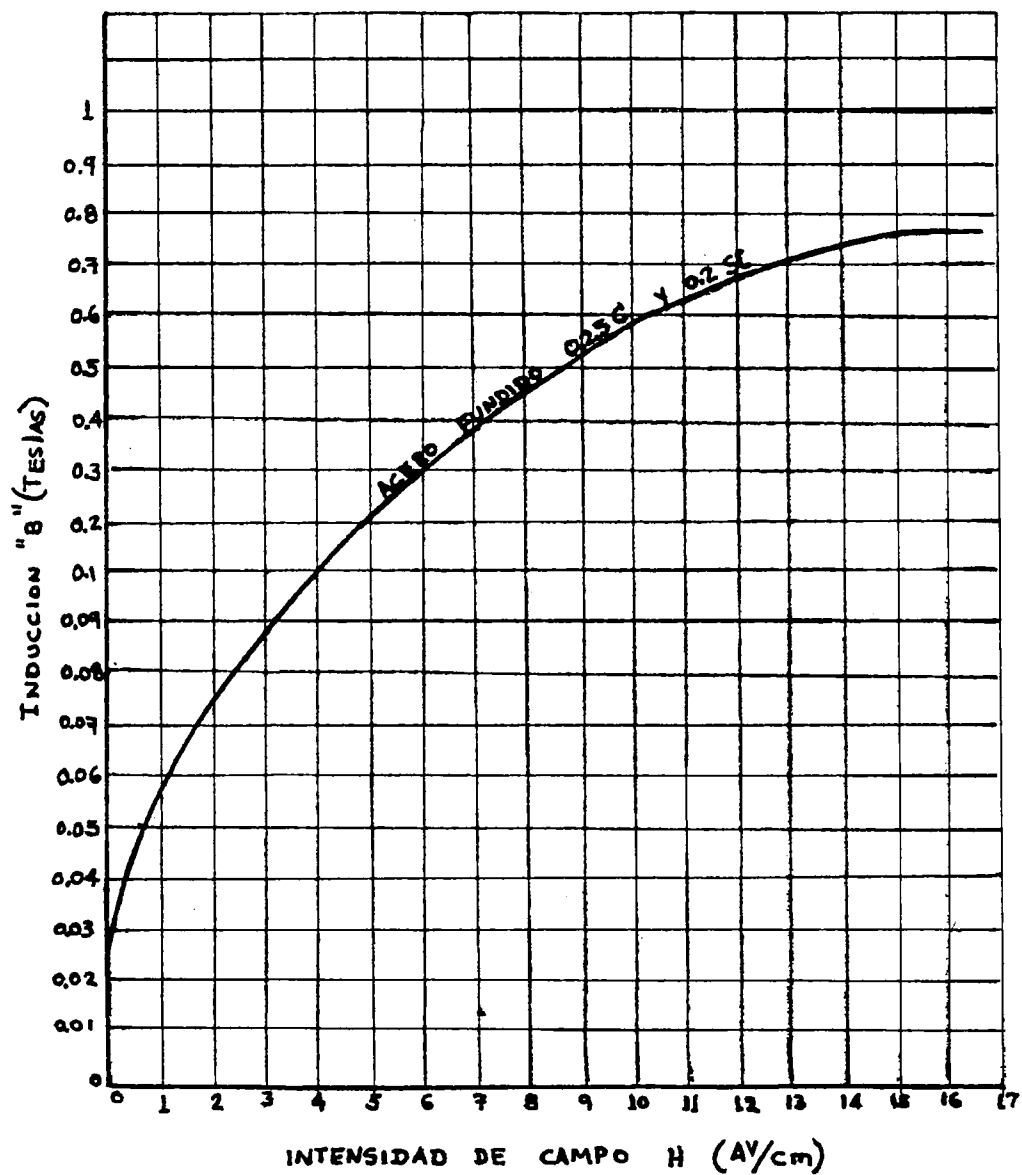


FIGURA 30 . Característica magnética del acero fundido utilizado en la construcción del alternador didáctico 0.25% de carbono y 0.20% silicio



De la curva característica se obtiene que el campo  $\hat{H}_{yo}$  para esta inducción es

$$\hat{H}_{yo} = 2,8 \frac{A \cdot V}{cm}$$

La excitación necesaria para el yugo en vacío se obtiene teniendo en cuenta la longitud media de una línea de fuerza al pasar por el yugo la cual fué calculada antes.

$$l_y = 14,922 \text{ cm}$$

$$\hat{\Theta}_{yo} = \hat{H}_{yo} \times l_y$$

$$\hat{\Theta}_{yo} = 2,8 \frac{A \cdot V}{cm} \times 14,922 \text{ cm}$$

$$\hat{\Theta}_{yo} = 41,781 \frac{A \cdot V}{\text{polo}}$$

#### 8.4 PERMEANCIA DE DISPERSION POLAR EN EL ROTOR

En el cálculo de la permeancia de dispersión polar se consideran varias zonas de dispersión polar:

- Dispersión longitudinal entre las expansiones polares.
- Dispersión frontal entre las expansiones polares.
- Dispersión longitudinal entre las caras polares.

- Dispersión frontal entre las caras polares

Para el cálculo de cada una de estas dispersiones se tendrán en cuenta las siguientes longitudes: ( Figura 31 )

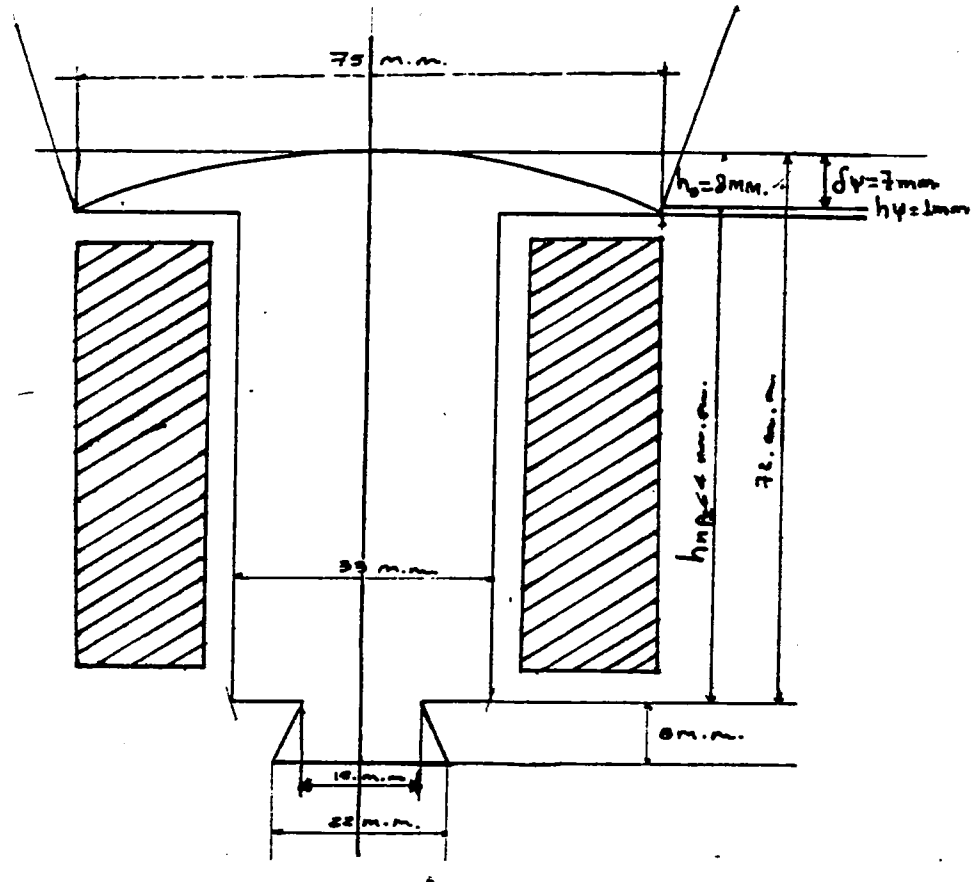


FIGURA 31 . Dimensiones definitivas del polo

Longitud de la expansión polar:  $L_p = 20 \text{ mm}$

Arco de la expansión polar :  $b_p = 75 \text{ mm}$

Altura de la expansión polar :

En el centro  $h_0 = 8 \text{ mm}$

En los extremos  $h_\psi = 1 \text{ mm}$

Se obtiene ahora una altura equivalente

$$h_{\psi \text{ eq}} = \frac{2h_{\psi} + h_o}{3} = \frac{2 \times 1 + 8}{3} = \frac{10}{3} = 3.33$$

$$h_{\psi \text{ eq}} = 3,33 \text{ mm}$$

El arco medio existente entre las expansiones polares es:

$$b_1 = \frac{\pi (D - 2\delta - h_o)}{2p} - b_p$$

$$b_1 = \frac{\pi (200 - 2(1) - 8)}{2 \times 2} - 75$$

$$b_1 = 74,22 \text{ mm}$$

El arco medio entre los núcleos polares:

$$b_3 = \frac{\pi (D - 2\delta - 2h_o - h_{np})}{2p} - b_{np}$$

$$b_3 = \frac{\pi (200 - 2 \times (1) - 2(8) - 64)}{2 \times (2)} - 33$$

$$b_3 = 59,67 \text{ mm}$$

En la Figura 32 se observa la localización de los arcos medios que se han obtenido para utilizar en el cálculo de las permeancias de dispersión.

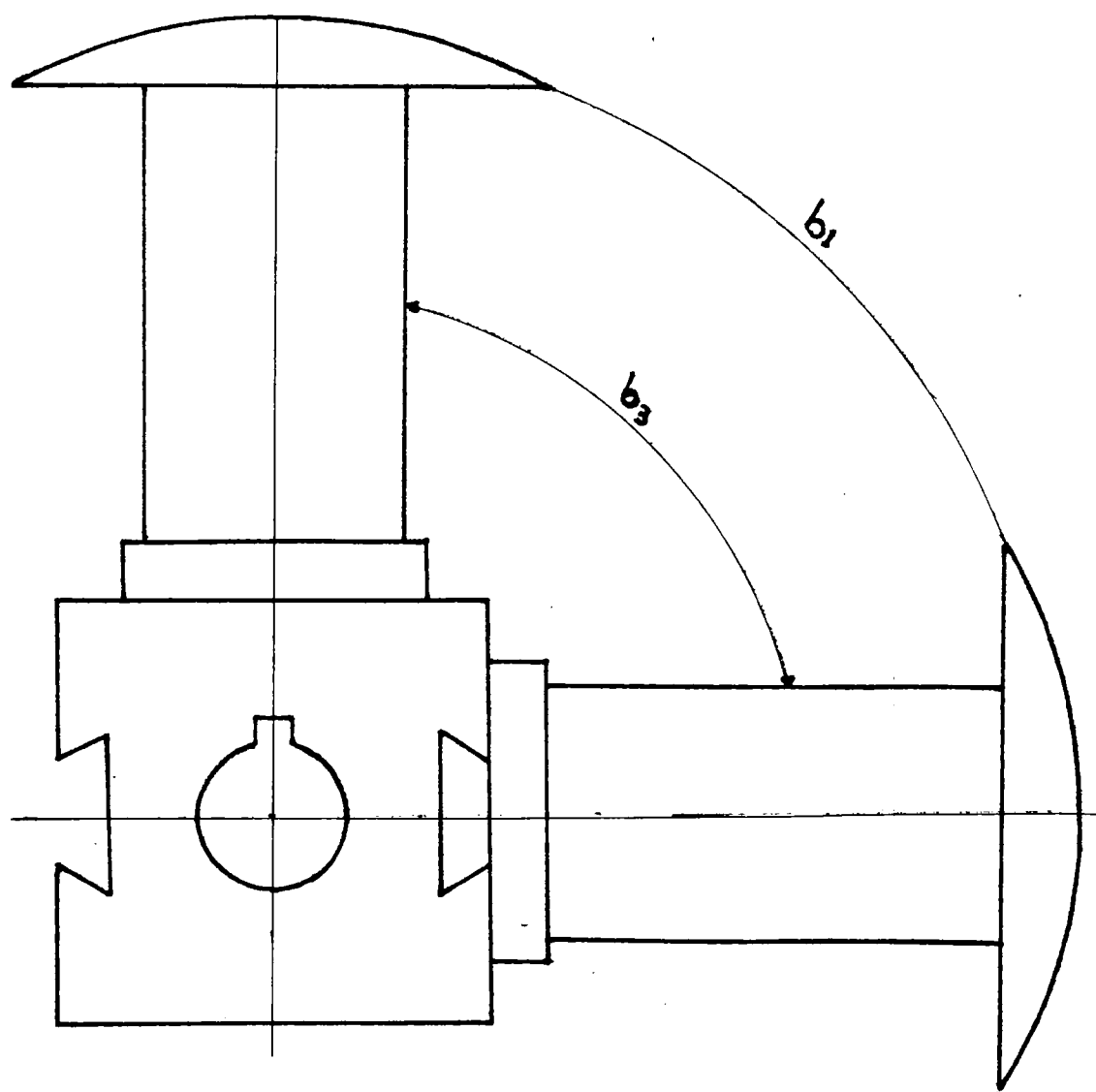


FIGURA 32 . Localización de los arcos medios

#### 8.4.1 Permeancia zona axial entre expansiones polares ( Zona 1 )

Para la permeancia de la zona axial entre las expansiones polares se utilizará la siguiente fórmula:

$$A_1 = \frac{5.026 L h \psi_{eq}}{b_1} \frac{M}{A \cdot V}$$

$$A_1 = \frac{5.026 4 \times 3.33}{7.422} \frac{M}{A \cdot V}$$

$$A_1 = 9.019 \frac{M}{A \cdot V}$$

#### 8.4.2 Permeancia zona frontal ( zona 2 )

En la zona frontal entre expansiones polares se consideran trazos rectos terminados por trazos curvilíneos como se muestra en la Figura 33 , tomando  $h \psi$  constante.

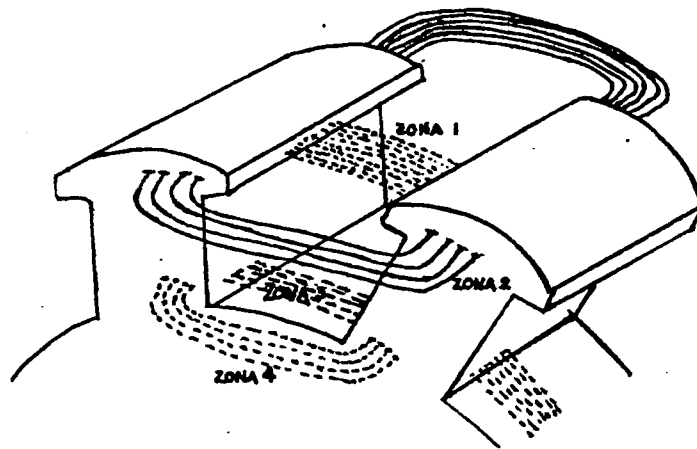


FIGURA 33 . Zonas donde se presenta dispersión polar

$$A_2 = 7.36 h \psi \text{ eq } \log_{10} \left( 1 + \frac{\pi}{2} \frac{b_p}{b_1} \right) \frac{M}{A \cdot V}$$

$$A_2 = 7.36 \times 3.33 \log_{10} \left( 1 + \frac{\pi}{2} \frac{7.5}{7.422} \right) \frac{M}{A \cdot V}$$

$$A_2 = 10.11 \frac{M}{A \cdot V}$$

#### 8.4.3 Permeancia entre caras longitudinales (zona 3)

En la zona 3 la permeancia entre caras longitudinales de dos núcleos polares se calcula de la siguiente manera:

$$A_3 = \frac{2.512 L_{np} h_{np}}{b_3} \frac{M}{A \cdot V}$$

$$A_3 = \frac{2.512(4 \times 6.4)}{5.967} \frac{M}{A \cdot V}$$

$$A_3 = 10.77 \frac{M}{A \cdot V}$$

#### 8.4.4 Permeancia entre caras frontales del núcleo polar (zona 4)

En la zona 4 la permeancia entre caras frontales de los núcleos polares es:

$$A_4 = 3.68 h_{np} \left( 1 + \frac{\pi}{2} \frac{b_{np}}{b_3} \right) \frac{M}{A \cdot V}$$

$$A_4 = 3.68 \times 6.4 \left( 1 + \frac{\pi}{2} \frac{3.3}{5.967} \right) \frac{M}{A \cdot V}$$

$$A_4 = 44,01 \frac{M}{A \cdot V}$$

La permeancia total de dispersión polar es:

$$A_p = A_1 + A_2 + A_3 + A_4$$

$$A_p = 9,019 + 10,11 + 10,77 + 44,01$$

$$A_p = 73,909 \frac{M}{A \cdot V}$$

## 8.5 POLOS

La fuerza magnetomotriz de dispersión polar en vacío es:

$$\Theta_{GP0} = \hat{\Theta}_{J0} + \hat{\Theta}_{d0} + \hat{\Theta}_{Y0}$$

$$\Theta_{GP0} = 66,56 + 0,44 + 41,781 \frac{A \cdot V}{\text{polo}}$$

$$\Theta_{GP0} = 108,781 \frac{A \cdot V}{\text{polo}}$$

Con este valor se obtiene el flujo de dispersión polar considerando toda la permeancia de dispersión polar en vacío.

$$\phi_{GP0} = \Theta_{GP0} A_p$$

$$\phi_{GP0} = 108,781 \times 73,909$$

$$\phi_{GP0} = 8039,895 M = 8,039895 \times 10^{-5} \text{ Wb}$$

Teniendo el flujo efectivo en el entrehierro en vacío más el flujo de dispersión polar se calcula el flujo polar.

Se conocía  $\hat{B}_0 = 0.08238$  T inducción definitiva en el entrehierro, la cual sirve para obtener el flujo teórico senoidal del entrehierro en vacío.

$$\begin{aligned}\phi_0 &= \frac{2}{\pi} \tau L \hat{B}_0 \\ \phi_0 &= \frac{2}{\pi} 0.155 \times 0.04 \times 0.08238 \\ \phi_0 &= 3,25 \times 10^{-4} \text{wb}\end{aligned}$$

Teniendo en cuenta el factor relativo de forma de 0.98 se tiene el flujo efectivo en el entrehierro en vacío.

$$\begin{aligned}\hat{\phi}_0 &= K_f \phi_0 \\ \hat{\phi}_0 &= 0.98 \times 3,25 \times 10^{-4} \\ \hat{\phi}_0 &= 3.185 \times 10^{-4} \text{Wb}\end{aligned}$$

El flujo polar es:

$$\begin{aligned}\phi_{PO} &= \hat{\phi}_0 + \phi_{\sigma PO} \\ \phi_{PO} &= 3,185 \times 10^{-4} + 8,039895 \times 10^{-5} \\ \phi_{PO} &= 4,05399 \times 10^{-4} \text{Wb}\end{aligned}$$



El coeficiente de dispersión polar en vacío es la relación entre el flujo por polo  $\phi_P$  y el flujo en el entrehierro.

$$\sigma_{PO} = \frac{\phi_{PO}}{\phi_{\delta o}} = \frac{\hat{\phi}_{\delta o} + \phi_{\sigma PO}}{\hat{\phi}_{\delta o}}$$

$$\sigma_{PO} = 1 + \frac{\phi_{\sigma PO}}{\hat{\phi}_{\delta o}}$$

$$\sigma_{PO} = 1 + \frac{8,039895 \times 10^{-5} \text{ Wb}}{3,185 \times 10^{-4} \text{ Wb}}$$

$$\sigma_{PO} = 1,25$$

Se considera ahora la sección que atravesará el flujo polar y se calcula así:

$$S_p = K_F \cdot E \cdot L_{np} \cdot b_{np}$$

$$S_p = 1 \times 20 \times 3,3$$

$$S_p = 66 \text{ mm}^2 = 6,6 \times 10^{-4} \text{ M}^2$$

La inducción en el núcleo polar

$$B_{PO} = \frac{\phi_{PO}}{S_p}$$

$$B_{PO} = \frac{4,05399 \times 10^{-4} \text{ Wb}}{0,00066 \text{ M}^2}$$

$$B_{PO} = 0,6142 \text{ Teslas}$$

Conocida  $B_{PO}$ , la curva de magnetización para el acero fundido utilizado en la máquina, nos proporciona la intensidad de campo  $H_{PO}$  requerido por esta inducción.

$$H_{PO} = 10.5 \frac{A \cdot V}{cm}$$

La excitación para el polo en vacío es:

$$\Phi_{PO} = H_{PO} L_p$$

$$\Phi_{PO} = 10.5 \times 7.2$$

$$\Phi_{PO} = 75.6 \frac{A \cdot V}{polo}$$

#### 8.6 NUCLEO DEL ROTOR ( CUBO )

Se considera que el flujo en el cubo es aproximadamente:

$$\phi_{no} = 3.875 \times 10^{-4} \text{wb}$$

La sección que tiene el cubo por donde pasará el flujo es:

$$S_n = L_n h_n$$

$$S_n = 20 \times 71$$

$$S_n = 1.420 \text{ mm}^2 = 0.0142 \text{ m}^2$$

La inducción en el núcleo es:

$$B_{no} = \frac{\phi_{no}}{2S_n} = \frac{3,875 \times 10^{-4}}{2 \times 0.0142}$$

$$B_{no} = 0,01364 \text{ Teslas}$$

De la curva de magnetización el valor obtenido de  $H_{no} \left( \frac{A \cdot V}{cm} \right)$  para

$$B_{no} = 0.066 \text{ Teslas}$$

$$H_{no} = \frac{0.2 \text{ A} \cdot \text{V}}{cm}$$

La excitación necesaria para el núcleo se debe calcular también teniendo en cuenta la longitud media de las líneas de fuerza que fué calculada en el Capítulo 7.

$$\phi_{no} = H_{no} l_n = 0.2 \frac{A \cdot V}{cm} \times 2,12 \text{ cm}$$

$$\phi_{no} = 0.424 \text{ A} \cdot \text{V}$$

## 8.7 EXCITACION EN VACIO

Después de haber obtenido las fuerzas magnetomotrices necesarias en cada una de las trayectorias magnéticas se determina la total necesaria por polo o excitación en vacío.

$$\Phi_{bo} = (\hat{\Phi}_{\int o} + \hat{\Phi}_{do} + \hat{\Phi}_{yo}) + \Phi_{po} + \Phi_{no}$$

$$\Phi_{bo} = (66,5 + 0,44 + 41,781) + 75,6 + 0,424$$

$$\Phi_{bo} = 184,745 \frac{A \cdot V}{\text{polo}}$$

## 9. EXCITACION A PLENA CARGA Y $\cos \phi$ NORMAL

En el siguiente cálculo se tiene en cuenta la teoría de las dos reacciones de "BLONDEL" mediante la cual se analiza la reacción de armadura como compuesta de dos partes a saber:

Una onda que obra frente al polo llamada "componente longitudinal" y que puede ser totalmente desmagnetizante en los casos de carga inductiva o ser totalmente magnetizante en el caso de carga capacitiva; o sea las cargas inductivas tienden a desexcitar los generadores y las cargas capacitivas a sobreexcitarlos.

En el caso de cargas activas resistivas la corriente estará en fase con la fuerza electromotriz en cada una de las tres fases. En este caso los máximos de la onda coinciden constantemente con los ejes de las bobinas en las cuales la f.e.m. es máxima; y estos a su vez, con los ejes interpolares giratorios; o sea que la reacción aquí es constantemente transversal.

En este análisis importa la onda fundamental y en cuanto a los armónicos se recuerda que los terceros y sus múltiplos se anulan y el manejo de los demás se consideran incluidos en la dispersión.

Las cargas más frecuentes en los generadores son mixtas, ya sea semi-inductiva o semi-capacitiva, entonces el valor máximo de la onda resultante se descompone en dos, uno transversal y uno longitudinal del valor máximo.

$$\hat{\theta}_t = \hat{\theta} \cos \alpha$$

$$\hat{\theta}_l = \hat{\theta} \sin \alpha$$

El ángulo espacial medio en grados eléctricos es el mismo que existe entre la corriente y el voltaje de cada fase.

#### 9.1 OBTENCION DE COEFICIENTES "C<sub>l</sub>" y "C<sub>t</sub>" PARA POLOS SALIENTES

Para un alternador trifásico, la expresión de la componente del campo inductor necesaria para contrarrestar la reacción longitudinal debida a la f.m.m. de inducido, reducida a la fundamental considerada, será:

$$\theta_{lb} = \theta_{Cl} \text{ Sen } \sigma = \frac{\pi}{\sqrt{2}} C_l \left( \frac{\pi}{2} \tau_p \right) \text{ Sen } \omega$$

De la anterior ecuación se hace necesario calcular "Cl" que depende del coeficiente de recubrimiento polar que en este caso es de

$\psi = 0.66$  y de la forma del entrehierro que ya fué definido en base a una forma senoidal. Para obtener la constante "Cl" se calculará primero la onda fundamental de la fuerza magnetomotriz de armadura longitudinal mediante la transformada de Fourier; a partir de aquí se deduce la excitación uniforme de la onda rectangular alterna que tendida sobre un arco polar igual al de cada polo "bp" tendrá como componente fundamental la misma senoide.

Según lo anterior:

$$C_l = \frac{4}{3} \frac{\text{Sen } \psi \frac{\pi}{2} \left( \text{Cos}^2 \psi \frac{\pi}{2} + 2 \right)}{\psi \pi + \text{Sen } \psi \pi}$$

$$C_l = \frac{4}{3} \frac{\text{Sen } 0.66 \frac{\pi}{2} \left( \text{Cos}^2 0.66 \frac{\pi}{2} + 2 \right)}{0.66 \pi + \text{Sen } 0.66 \pi}$$

$$C_l = 0.8789$$

Con un proceso similar se procede con la onda fundamental de fuerza magnetomotriz transversal de armadura, obteniéndose en este caso el factor "Ct" igual a:

$$C_t = \frac{4}{3} \frac{\text{Sen}^3 \psi \frac{\pi}{2} + \frac{1}{4} \text{Cos}^2 \psi \frac{\pi}{2}}{\psi \pi + \text{Sen}(\psi \pi)}$$

$$C_t = \frac{4}{3} \frac{\text{Sen}^3 0.66 \frac{\pi}{2} + 1/4 \text{Cos}^2 0.66 \frac{\pi}{2}}{0.66 \pi + \text{Sen}(0.66 \pi)}$$

$$C_t = 0.3175$$

## 9.2 REACTANCIA DE DISPERSION

Los diversos aspectos funcionales con que el flujo o partes de él intervienen en el comportamiento de las máquinas eléctricas, plantea problemas de difícil solución cuando se intenta, por razones de orden y uniformidad de criterio, seguir un método exclusivo en el tratamiento de todos aquellos flujos a lo largo de los circuitos magnéticos de la máquina.

Son dos los conceptos, uno desde el punto de vista del servicio y otro de tipo constructivo, los que justifican el establecer distinciones que, en términos estrictos, pueden calificarse de arbitrarias, pero que contribuyen, sin embargo en gran manera a hacer posible el estudio numérico de ciertos fenómenos.

Dichos conceptos son, por un lado el carácter principalmente activo o útil de algunos de estos flujos y el carácter predominantemente pasivo y, en ocasiones perjudicial, de otros flujos de la máquina. De



aquí surge una primera clasificación, seguida de un tratamiento para el flujo llamado principal, útil o común y otro distinto para los flujos denominados de dispersión. Incluso, estos últimos reciben a su vez una consideración diferente según sus efectos sean nada más que aditivos sobre el flujo principal, provocando fenómenos de saturación en determinadas zonas del circuito magnético de la máquina ( flujos de dispersión polar ), o bien participen en la generación de la f.e.m. total a manera de reactancias en serie.

Así se llega en conjunto a la distinción esencial entre flujo común y flujos de dispersión. El primero, como su nombre indica, está concatenado con los devanados primario y secundario de la máquina. Transcurre sobre el hierro y sirve de vehículo transmisor de la energía entre los circuitos eléctricos principales. Los segundos, los de dispersión, se caracterizan por hallarse concatenados sólo con los arrollamientos primarios o secundarios sin intervenir directamente en la transmisión de la energía entre unos y otros, y su recorrido principal es a través del aire.

#### 9.2.1 Ancho de las ranuras

En nuestro trabajo se tienen ranuras en forma trapezoidal con las siguientes dimensiones como lo ilustra la Figura 34.

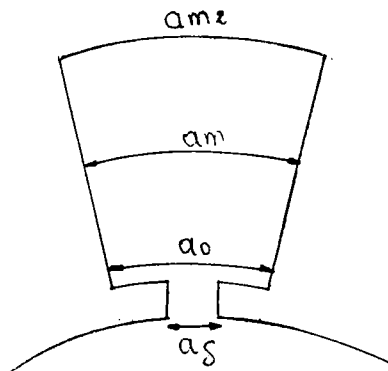


FIGURA 34 . Forma de la ranura

$a_{mx}$  = ancho máximo de la ranura = 295.57 mm

$a_m$  = ancho medio de la ranura = 258.39 mm

$a_o$  = ancho mínimo de la ranura = 211.22 mm

$a_\delta$  = ancho en el entrehierro = 146.44 mm

#### 9.2.2 Alturas de las ranuras

Aquí se debe tener en cuenta la altura de los conductores, la altura en el entrehierro y la altura en el extremo de la ranura, como se aprecia en la Figura 35.

$H$  = altura de los conductores = 33.5 mm

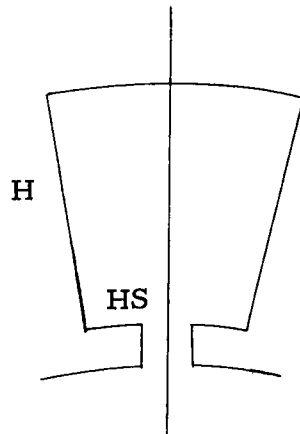


FIGURA 35. Alturas de las ranuras

$H$  = altura en el entrehierro = 4.5 mm

$H_s$  = extremo de la ranura = 1 mm

### 9.2.3 Corrección para la altura de conductores y resto de ranura

Los factores de corrección para la altura de conductores son dos:

$K_c$  = es el factor de corrección para la permeancia del cuerpo de las bobinas

$K_a$  = es el factor de corrección para la permeancia del espacio exterior de las bobinas

Estos factores dependen del paso de bobina  $y_n$   
 $p$

$y_n$  = es el paso de bobina medio que en nuestro caso corresponde  
 al ancho de la bobina estat6rica

$$y_n = 15 \text{ mm} + 50 \text{ mm} + 15 \text{ mm} = 80 \text{ mm}$$

$$t_p = 120 \text{ mm}$$

$$\text{El paso relativo de bobina} = \frac{y_n}{p} = \frac{80}{120} = 0.666$$

Con este paso relativo de bobina obtuvimos el factor de bobinado

$$k = 0.866 \text{ el cual se explic6 en el Capitulo 6.}$$

Este punto lo ubico en la Figura 36 y encuentro el valor de  $K_a$  y  $K_c$

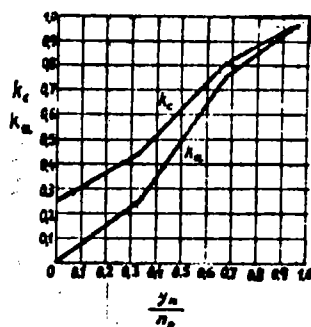


FIGURA 36 . Factores de corrección  $K_c$  para la permeancia del cuerpo de las bobinas en la ranura y  $K_a$  para la permeancia del espacio exterior a las bobinas

$$K_c = 0.92 \quad K_a = 0.9$$

#### 9.2.4 Corrección por concentración de corriente

Cuando se trata de conductores de gran altura en sentido radial, es decir, en sentido perpendicular al flujo disperso, la mayor reactancia de los filamentos de corriente próximos al fondo de la ranura que se hallan enlazados con un número más elevado de líneas de fuerza autoinductivas, tiende a aumentar la densidad de corriente en las capas superficiales próximas al entrehierro, con lo cual se producen dos efectos secundarios: un incremento aparente de la resistencia eléctrica del conductor y una disminución simultánea del número de concatenaciones efectivas, equivalente a una disminución de la permeancia de dispersión, en la masa del conductor.

El coeficiente de corrección  $K$  a aplicar por este motivo a la permeancia del cuerpo de bobina en las ranuras se deduce de la Figura 37 en función de un parámetro ( $\mathcal{V}\mathcal{L}$ ) denominado altura aparente de conducción, definido como sigue:

$\mathcal{V}$  = número de estratos de conductores aislados, radialmente superpuestos

$\mathcal{L}$  = parámetro sin dimensión (geométricamente, ángulo en radianes) no obstante lo cual suele llamársele "altura equivalente"

dado por:  $\mathcal{L} = \alpha h \text{ cm}^\circ$

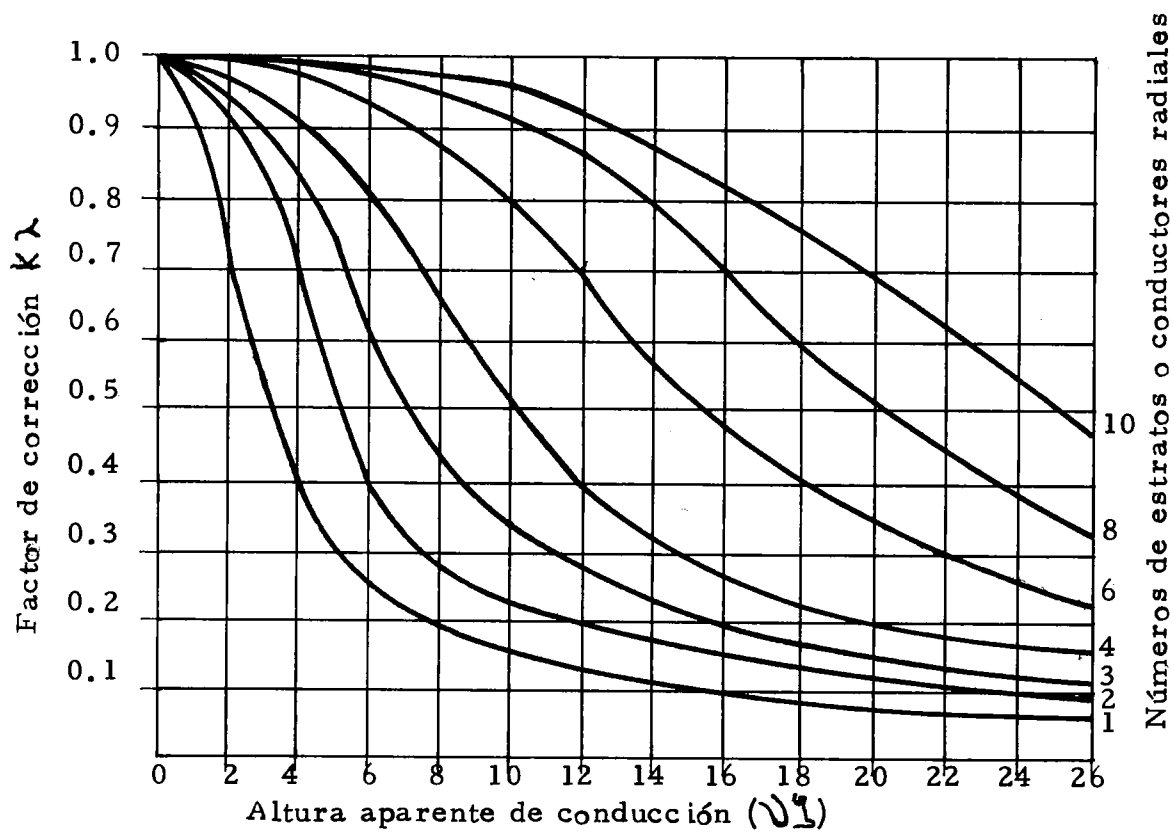


FIGURA 37. Factor de corrección  $K\lambda$  para la permeancia de dispersión en el cuerpo del bobinado dentro de la ranura en función de la altura aparente de conducción ( $Nl$ ).

Siendo

$h$  = altura radial del conductor simple en cm, o suma de las alturas radiales simples si el conductor es múltiple compuesto de varias barras aisladas superpuestas en paralelo, y

$$\alpha = 0.2 \pi \sqrt{\frac{a_c}{a_m} \cdot \frac{H_c}{H} \times \frac{f}{10^3 \rho K_{\alpha}}} \text{ cm}^{-1}$$

$\alpha$  = parámetro para calcular la altura equivalente

$a_m$  = ancho medio de la ranura

$a_c$  = ancho de la ranura ocupada por los conductores

$H_c$  = altura neta de conductores en la ranura

$H$  = altura entre planos extremos de conductores

$f$  = frecuencia en Hz

$\rho$  = resistividad del conductor en  $\frac{\Omega \times \text{mm}^2}{\text{m}}$

$K_{\alpha}$  = coeficiente de circulación local o de corrección por conductores en paralelo, igual a uno si cada conductor va compuesto de una sola barra o hilo, o si los componentes se hallan situados en el mismo estrato dando una altura  $h$  simple.

El procedimiento a seguir es calcular el parámetro así:

$a_m$  = 258.39 mm

$a_c$  =  $64 \times \phi_{cu}$  + número de capas aislantes papel prespan de 1 mm

$$ac = 64 \times 0.455 + 64$$

$$ac = 93.12 \text{ mm}$$

$$H_c = 33.5 \text{ mm}$$

$$H = 33.5 \text{ mm porque no hay separadores entre estratos}$$

$$f = 60 \text{ Hz}$$

$$\rho = 0.0172 \frac{\Omega \times \text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$K_{\infty} = 1 \text{ porque no hay conductores en paralelo}$$

$$\alpha = 0.2 \pi \sqrt{\frac{93.12}{258.39} \frac{33.5}{33.5} \frac{60}{10^3 \times 0.0172 \times 1}}$$

$$\alpha = 0.2 \pi \sqrt{1.257158595}$$

$$\alpha = 0.7045 \text{ cm}^{-1}$$

La altura equivalente  $\zeta$  teniendo como altura del conductor el diámetro del mismo  $h = 0.455$

$$\zeta = 0.7045 \times 0.455$$

$$\zeta = 0.3205475$$

La altura aparente de conducción con 26 estratos es:

$$v_{\zeta} = 0.3205475 \times 26$$

$$v_{\zeta} = 8.3342$$

Ubicando este punto en la Figura 37 encontramos que  $K_{\lambda} = 0.97$



### 9.2.5 Permeancia específica de ranura

La permeancia específica de ranura  $\lambda$  se calcula teniendo en cuenta la siguiente fórmula:

$$\lambda = \frac{H}{3am} \times K_c \times K_\lambda + \frac{H_s}{a_o} K_a + \frac{H_\delta}{a_\delta} \times K_a$$

$$\lambda = \frac{33,5}{3 \times 258,39} \times 0.92 \times 0.97 + \frac{1}{211,22} \times 0.9 + \frac{4,5}{146,44} \times 0.9$$

$$\lambda = 0.0386 + 0.00426 + 0.0277$$

$$\lambda = 0.07056 \frac{M/Gb}{cm}$$

### 9.2.6 Permeancia específica en las cabezas de dientes $\lambda_t$

El flujo de dispersión en las cabezas de dientes es siempre de concatenación íntegra con el bobinado respectivo.

Para las máquinas de fuerte entrehierro, el valor de la permeancia específica en unidades C.G.S. puede calcularse por una de estas dos ecuaciones:

$$\lambda_t = \frac{\delta}{a_\delta + 0.8\delta} \left( \frac{M/Gb}{cm} \right)$$

Reemplazando los valores de  $\delta = 1 \text{ mm}$  y  $a_\delta = 211,22 \text{ mm}$  se obtiene:

$$\lambda_t = \frac{1}{211,22 + 0,8 \times 1}$$

$$\lambda_t = 0,004717 \frac{M/Gb}{cm}$$

O bien:

$$\lambda_t = \frac{5 \frac{\delta}{a\delta}}{5 + \frac{4\delta}{a\delta}} \frac{M/Gb}{cm}$$

$$\lambda_t = \frac{5 \frac{1}{211,22}}{5 + \frac{4 \times 1}{211,22}}$$

$$t = 0,004717 \frac{M/Gb}{cm}$$

#### 9.2.7 Permeancia específica total de dispersión $\lambda_x$

La permeancia específica total de dispersión  $\lambda_x$  es la sumatoria de todas las permeancias lineales que integran la dispersión del devanado considerado

En nuestro proyecto la permeancia específica total de dispersión  $\lambda_x$  será igual a la suma de la permeancia específica de ranura  $\lambda$  y la permeancia específica en las cabezas de dientes  $\lambda_t$

$$\lambda_x = \sum \lambda = \lambda + \lambda_t$$

$$\lambda_x = 0,07056 + 0,004717$$

$$\lambda_x = 0.075277 \frac{M/Gb}{cm}$$

#### 9.2.8 Permeancia equivalente por ranura $\Delta_x$

Reducidas todas las permeancias específicas a la longitud acial L de la máquina tal como lo hemos venido efectuando, el valor de la permeancia equivalente por ranura  $\Delta_x$  está dado por:

$$\Delta_x = L \lambda_x = L (\sum \lambda)$$

$$\Delta_x = 4 \times 0,075277$$

$$\Delta_x = 0,301108 M/Gb$$

La inductancia de dispersión por fase es:

$$L_x = 8 \cdot \pi \cdot 10^{-9} \cdot P \cdot npf \cdot Z_n^2 \cdot \Delta_x$$

$$L_x = 8 \times \pi \times 10^{-9} \times 2 \times 1 \times (834)^2 \times 0,301108 H/fase$$

$$L_x = 0.01053 H/fase$$

La reactancia de dispersión polar por fase es:

$$X = 2 \pi \cdot f \cdot L_x$$

$$X = 2 \times \pi \times 60 \times 0,01053$$

$$X = 3,9697 \Omega/fase$$

La f.e.m. de reactancia por fase es:

$$E_x = X \cdot I_f$$

$$E_x = 3,9697 \times 0.656$$

$$E_x = 2,60 \text{ V/fase}$$

Colocando la f.e.m. de reactancia por fase  $E_x$  en porcentaje % la tensión en bornes por fase es:

$$\% e_x = \frac{E_x}{U_f} \times 100$$

$$\% e_x = \frac{2,60}{127} \times 100$$

$$\% e_x = 2,04\% \text{ de } U_f$$

Se puede efectuar un cálculo más directo de la caída relativa de reactancia para máquinas trifásicas.

$$\% e_x = \frac{1,86}{\% \text{ npf}} \left( \frac{q}{100} \right) \left( \frac{\lambda_x}{\tilde{B} \sigma_o} \right)$$

$$\% e_x = \frac{1,86}{0,866 \times 1} \left( \frac{103,53}{100} \right) \left( \frac{0,075277}{0,08238} \right)$$

$$\% e_x = 2,03\% \text{ de } U_f$$

La pérdida relativa por efecto Joule y caídas óhmicas, se puede cal-

cular de dos formas:

La primera forma es teniendo en cuenta la resistencia del arrollamiento de la bobina, la corriente por fase y la tensión por fase, así:

$$\mu_R^* = \frac{R \cdot I \times 100}{U}$$

Reemplazando estos valores tenemos que:

$$\mu_R^* = \frac{35 \Omega \times 0.656 \times 100}{127}$$

$$\mu_R^* = 18,0 \%$$

La segunda forma de calcular las pérdidas por efecto Joule y caída óhmica es teniendo en cuenta la resistividad del conductor, la longitud media de la bobina, la longitud del inducido, la densidad de la corriente, la densidad de flujo en el entrehierro, el diámetro de inducido, la velocidad de la máquina y el factor de bobinado. Todos estos factores se agrupan en la siguiente fórmula:

$$\mu_R^* = \frac{270 \rho}{\frac{p}{\pi} \cdot D} \cdot \frac{\left(\frac{lm}{L}\right)}{\left(\frac{N}{1000}\right)} \cdot \frac{\Delta}{\tilde{B} \cdot \int_0}$$

lm que es la longitud media de la bobina, se calcula de acuerdo al diseño establecido en el Capítulo 6.

$$lm = (7.5 + 4 + 50 + 4 + 7.5) + (7.5 + 4 + 14 + 4 + 7.5)$$

$$lm = 110 \text{ mm}$$

Reemplazando estos valores en la fórmula encontramos que:

$$\mu_e^* = \frac{270 \text{ P}}{\frac{g}{P} D} \frac{\left(\frac{lm_p}{L}\right)}{\left(\frac{N}{1000}\right)} \frac{\Delta}{B_o \delta_o}$$

$$\mu_e^* = \frac{270 \times 0.0172}{0.866 \times 20} \frac{\left(\frac{11.0}{4}\right)}{\left(\frac{1.800}{1.000}\right)} \frac{4}{0.08238}$$

$$\mu_e^* = 19.8\% \text{ Adoptamos } \mu_e^* = 18.9\%$$

### 9.3 DETERMINACION DEL DIAGRAMA FASORIAL

La componente transversal de la reacción de inducido obedece a la siguiente fórmula:

$$\frac{\hat{\Theta}_{tb}}{\cos \alpha} = (0.45 \frac{g}{P} I_q T_p) C_t$$

$$\frac{\Theta_{tb}}{\cos \alpha} = (0.45 \times 0.866 \times 103.53 \times 15.5) 0.3175$$

$$\frac{\Theta_{tb}}{\cos \alpha} = 198.55 \frac{\text{A} \cdot \text{V}}{\text{polo}}$$

El flujo transversal fundamental

$$\hat{\Phi}_t = \frac{T_p L}{\frac{\pi}{2}} \hat{B}$$

$$\hat{B} = \frac{4}{10} \frac{\Phi_t / \cos \alpha}{KM \cdot KL \cdot Kc \cdot J}$$

$$\hat{\Phi}_t = \frac{0.8 \cdot T_p \cdot L (\Phi_t / \cos \alpha)}{KM \cdot KL \cdot Kc}$$

$$\hat{\Phi}_t = \frac{0.8 (15.5) (4.0) (198.55)}{(1.01) (1) (1) (0.1)}$$

$$\hat{\Phi}_t = 9.848,08 \text{ Maxwells}$$

La fuerza electromotriz en voltios eficaces es:

$$\frac{U_t}{\cos \alpha} = \frac{2,22 f \times \frac{N}{m} \times Z \times \hat{\Phi}_t \times 10^{-8}}{m}$$

$$\frac{U_t}{\cos \alpha} = \frac{2,22 (60) (0.866) (10008) (9,84808 \times 10^{-5})}{3}$$

$$\frac{U_t}{\cos \alpha} = 37,897 \text{ Voltios}$$

Pasando la f.e.m. transversal al sistema en P. U. expresado en porcentaje:

$$\frac{*U}{\cos \alpha} = \frac{U_t / \cos \alpha}{U_f} \times 100$$

$$\frac{\overset{*}{U}}{\cos \alpha} = \frac{37.897 \times 100}{127}$$

$$\frac{\overset{*}{U}}{\cos \alpha} = 29,84\% \text{ de la tensión de fase}$$

Se puede efectuar un cálculo más directo del valor relativo de la f.e.m. ficticia transversal para máquinas de polos salientes.

$$\frac{\overset{*}{U}}{\cos \alpha} = \frac{0,565 \times C_t \times \frac{p}{2} \times 1 \times T_p \times q / 100}{K_M \cdot K_L \cdot K_c \cdot d \cdot \frac{B}{\delta_o}}$$

$$\frac{\overset{*}{U}}{\cos \alpha} = \frac{0.565 \times (0.3175) \times (0.866) \times (15,5) \times (1,0353)}{(0.01)(1.0)(1.0)(0.1)(0.09238)}$$

### 9.3.1 F.E.M. a inducir por el flujo resultante

Para el cálculo de la f.e.m. a inducir por el flujo resultante, debemos trabajar con valores relativos tomando por referencia la tensión de fase  $U_f = 100$ . Esta tensión  $E$  se consigue a partir de la siguiente fórmula:

$$\overset{*}{E} = U_f + \overset{*}{U}_R \cos \phi + \overset{*}{e}_x \sin \phi + \frac{(\overset{*}{e}_x \cos \phi - \overset{*}{U}_R \sin \phi)^2}{2U_f}$$

Reemplazando valores tenemos:

$$E = 1 + 0,189 (0.85) + 0.0204 (0.5267) + \frac{[0.0204 (0.85) - 0.189 (0.5267)]^2}{2}$$



$$\frac{*}{E} = 1 + 0,16065 + 0,01074468 + 0,0033789$$

$$\frac{*}{E} = 1,1748 \text{ . P.U. } = 117,48\% \text{ de la tensión de fase } U_f$$

Esta tensión es la fuerza electromotriz que debe inducir el flujo resultante.

$$E = 117,48 \frac{127}{100}$$

$$E = 149,2 \text{ V/fase}$$

El ángulo "  $\alpha$  " es:

$$\text{Tg } \alpha = \frac{100 \text{ Sen } \phi + \frac{*}{e_x} + \frac{U_t}{\text{Cos } \alpha}}{100 \text{ Cos } \phi + a_R}$$

$$\text{Tg } \alpha = \frac{100 \times 0,5267 + 2,04 + 29,84}{100 \times 0,85 + 18,9} = \frac{84,55}{103,95}$$

$$\text{Tg } \alpha = 0,8134$$

$$\alpha = \text{Arc . tg } 0,8134$$

$$\alpha = 39,125^\circ$$

La f.e.m. equivalente a la reactancia transversal es:

$$\frac{*}{U_t} = \left( \frac{\frac{*}{U_t}}{\text{Cos } \alpha} \right) \text{ Cos } \alpha$$

$$\frac{*}{U_t} = 29,84 \times \text{Cos } 39,125^\circ$$

$$\frac{*}{U_t} = 29,84 \times 0,7758$$

$$\frac{*}{U_t} = 23,15 \% \text{ de la tensión de fase } U_f$$

El valor real de tensión es:

$$U_t = 23,15 \frac{127}{100}$$

$$U_t = 29,4 \text{ V/fase}$$

La fuerza electromotriz a inducir por el flujo total " $E\phi$ " es:

$$\frac{*}{E\phi} = \sqrt{\frac{*}{E^2} - \frac{*}{U_t}}$$

$$\frac{*}{E\phi} = \sqrt{(117,48)^2 - (29,4)^2}$$

$$\frac{*}{E\phi} = 113,74 \% \text{ de la tensión de fase } U_f$$

El valor real de la fuerza electromotriz a inducir por el flujo es:

$$E\phi = 113,74 \times \frac{127}{100}$$

$$E\phi = 144,45 \text{ V/fase}$$

La componente longitudinal de reacción de inducido se obtiene como sigue:

$$\phi_{lb} = (0,45 \frac{b}{p} 1 q \gamma) C_1 \text{ Sen } \alpha$$

$$\Theta_{1b} = 0.45 (0.866) (103.53) (12,0) (0.8789) \text{ Sen } 39,125^\circ \text{ AV/polo}$$

$$\Theta_{1b} = 268,5 \text{ AV/polo}$$

La Figura 38 nos muestra el diagrama vectorial del alternador didáctico según resultados obtenidos.

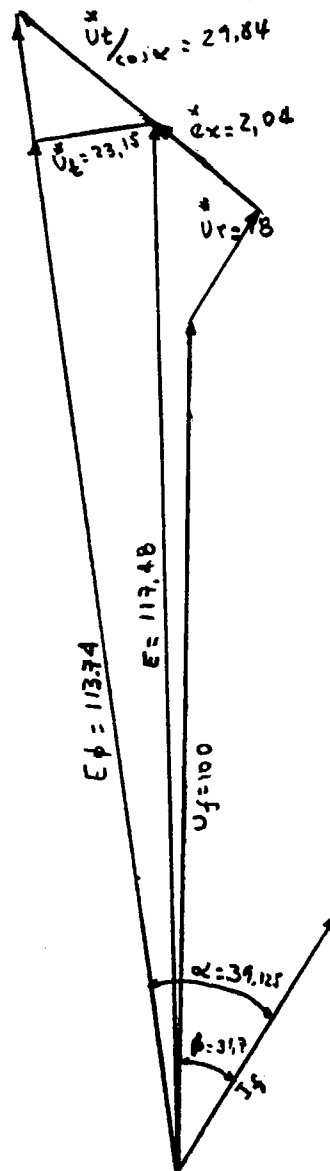


FIGURA 38 . Diagrama vectorial del alternador didáctico en valores relativos ( $U_f = 100\%$ )

## 9.4 EXCITACION EN CARGA

Se debe definir un factor para referir las inducciones en vacío a inducciones en carga tomándose igual al valor en porcentaje de la fuerza electromotriz inducida por el flujo.

$$K_b = 1,137$$

### 9.4.1 Entrehierro

Inducción

$$\hat{B}_f = K_b \times B_{f0}$$

$$\hat{B}_f = 1,137 \times 0,0832$$

$$\hat{B}_f = 0,0946 \text{ Teslas}$$

Intensidad de campo

$$\hat{H}_f = 0,8 \hat{B}_f \times 10^4$$

$$\hat{H}_f = 0,8 \times (0,0946) \times 10^4$$

$$\hat{H}_f = 756.8 \text{ AV/polo} \times \text{cm}$$

Excitación

$$\hat{\phi}_\delta = \hat{H}_\delta \delta$$

$$\hat{O}_\delta = 756.8 \times 0,1$$

$$\hat{O}_\delta = 75,68 \text{ AV/polo}$$

#### 9.4.2 Flujo en el entrehierro

$$\phi = K_f \times \phi_{\delta o}$$

Donde falta conocer el flujo teórico senoidal en el entrehierro en vacío,

$$\hat{\phi}_{\delta o}$$

$$\hat{\phi}_{\delta o} = \frac{2}{\pi} \tau_p L \hat{B}_{\delta o}$$

$$\hat{\phi}_{\delta o} = \frac{2}{\pi} (0.120) (0,04) (0.083238)$$

$$\hat{\phi}_{\delta o} = 2,51489 \times 10^{-4} \text{ weber}$$

Ahora el flujo efectivo en el entrehierro en vacío será:

$$\hat{\phi}_{\delta o} = K_f \hat{\phi}_{\delta o}$$

$$\hat{\phi}_{\delta o} = 0.98 (2,5148.9 \times 10^{-4})$$

$$\hat{\phi}_{\delta o} = 2,4153 \times 10^{-4} \text{ weber}$$

El flujo en el entrehierro con carga es:

$$\hat{\phi}_\delta = 1,137 \times 2,4153 \times 10^{-4}$$

$$\hat{\phi}_\delta = 2,746 \times 10^{-4} \text{ weber}$$

#### 9.4.3 Dientes

Para obtener la inducción aparente en los dientes se estima que la densidad de flujo no varía a lo largo del diente por tener una forma rectangular.

$$\hat{B}_{dM} = 0.02175 \text{ Teslas}$$

De la curva del material fundido se obtuvo el valor correspondiente a la intensidad de campo.

$$\hat{H}_d = 0,11 \text{ AV/cm}$$

El valor de la intensidad de campo en los dientes es:

$$\hat{H}_d = K_b \times H_d$$

$$\hat{H}_d = 1,137 \times 0,11$$

$$\hat{H}_d = 0,1251 \text{ AV/cm}$$

Considerando ahora la longitud obtenida del diente "ht" la excitación requerida por los mismos bajo cada polo asciende a:

$$\hat{\Theta}_d = \hat{H}_d h_t$$

$$\hat{\Theta}_d = 0,1251 \times 4$$

$$\hat{\Theta}_d = 0.5004 \text{ AV/polo}$$

#### 9.4.4 Yugo

Por el yugo circula todo el flujo efectivo del entrehierro y además el de dispersión de ranuras del inducido. Para el mantenimiento del flujo total aquí se requieren la fuerza magnetomotriz del sistema inductor y la del inducido. Si no existiese el fenómeno de saturación, podría evaluarse independientemente la fuerza magnetomotriz principal para la corona en cuestión contando únicamente con el flujo en el entrehierro.

#### Inducción

$$\hat{B}_y = K_b \times B_y \text{ Teslas}$$

$$\hat{B}_y = 1,137 \times 0,0824$$

$$\hat{B}_y = 0,0937 \text{ Teslas}$$

El campo obtenido en este caso del gráfico para el acero fundido utilizado en la construcción del alternador didáctico

$$\hat{H}_y = 3,2 \text{ AV/cm}$$

La excitación necesaria en este caso es:

$$\hat{\Theta}_y = H_y l_y$$

$$\hat{\Theta}_y = 3,2 \times 14,922 \text{ AV/polo}$$

$$\hat{\Theta}_y = 47,75 \text{ AV/polo}$$

#### 9.4.5 Inductor

Para obtener el flujo polar inductor se tiene en cuenta el flujo en el entrehierro, más el flujo de dispersión polar en carga el cual se obtiene a partir de la fuerza magnetomotriz de reacción longitudinal.

$$\Theta_{\sigma p} = (\hat{\Theta}_g + \hat{\Theta}_d + \hat{\Theta}_y) + \Theta_{lb} \text{ AV/polo}$$

$$\Theta_{\sigma p} = (75,68 + 0,5004 + 47,75) + 268,5$$

$$\Theta_{\sigma p} = 392,43 \text{ AV/polo}$$

El flujo de dispersión polar será obtenido teniendo en cuenta la permeancia total de dispersión polar calculada antes:

$$\phi_{\sigma p} = \Theta_{\sigma p} \times A_{\sigma p} \text{ Max}$$



$$\phi \sigma_p = 392,43 \times 73,9 \text{ Max}$$

$$\phi \sigma_p = 29000,58 \text{ Max}$$

Ahora ya podemos calcular el flujo polar en carga.

$$\phi_p = \hat{\phi}_\delta + \phi \sigma_p \text{ Wb}$$

$$\phi_p = 2,746 \times 10^{-4} + 2,900058 \times 10^{-4}$$

$$\phi_p = 5,646 \times 10^{-4} \text{ wb}$$

La relación entre el flujo por polo  $\phi_p$  calculado y el flujo en el entrehierro  $\phi_\delta$  se denomina coeficiente de dispersión polar  $\sigma_p$ .

$$\sigma_p = \frac{1 + \phi \sigma_p}{\phi_p}$$

$$\sigma_p = 1 + \frac{2,900058 \times 10^{-4}}{5,646 \times 10^{-4}}$$

$$\sigma_p = 1,5$$

Núcleo polar en carga:

Inducción

$$B_n = \frac{\phi_p}{\phi_{po}} B_{po}$$

$$B_n = \frac{5,646 \times 10^{-4}}{4,05399 \times 10^{-4}} \times 0.6142$$

$$B_n = 0.855 \text{ Teslas}$$

Teniendo esta densidad se toma el valor correspondiente al campo para el acero fundido.

$$\text{Campo } H_p = 20 \text{ AV/cm}$$

Luego la excitación en el núcleo polar es:

$$\Theta_p = H_p L_p \text{ AV/polo}$$

$$\Theta_p = 20 \times 7.2$$

$$\Theta_p = 144 \text{ AV/polo}$$

#### 9.4.6 Núcleo del rotor (cubo)

El valor del flujo en el núcleo queda definido en el momento de determinar el flujo polar, puesto que todo este debe pasar por el núcleo.

$$\phi_n = \phi_p = 5,64 \times 10^{-4} \text{ wb}$$

La inducción en carga es:

$$B_n = \frac{\phi_n}{\phi_{no}} \times B_{no} \text{ Teslas}$$

$$B_n = \frac{5,646 \times 10^{-4}}{3,875 \times 10^{-4}} \times 0.01364 \text{ Teslas}$$

$$B_n = 0.0199 \text{ Teslas}$$

Se debe recordar que los valores de  $\phi_{no}$  y  $B_{no}$  se han tomado del cálculo de excitación en vacío.

Ahora obtenemos el campo a partir del gráfico de magnetización del acero fundido.

$$H_n = 0.11 \text{ AV/cm}$$

La excitación necesaria es:

$$\Theta_n = H_n \ln \text{ AV/polo}$$

$$\Theta_n = 0.11 \times 2,12$$

$$\Theta_n = 0,2332 \text{ AV/polo}$$

Para encontrar la excitación total necesaria a plena carga, tensión nominal y  $\cos \phi = 0.85$ , se procede como sigue, tomando los valores que acabamos de calcular:

$$\Theta_{bp} = (\hat{\Theta}_f + \hat{\Theta}_d + \hat{\Theta}_y) + \Theta_{lb} + (\Theta_p + \Theta_n) \text{ AV/polo}$$

$$\Theta_{bp} = 392,43 + 144 + 0,2332$$

$$\Theta_{bp} = 536,66 \text{ AV/polo}$$

## 9.5 CARACTERISTICA MAGNETICA DE LA MAQUINA

La excitación de la máquina deberá responder por las caídas de tensión internas de la máquina y la reacción de armadura, que requiere un tratamiento especial por la diferencia de las reluctancias longitudinal y transversal.

La característica magnética se expresa gráficamente por la relación de tensión de salida contra nivel de excitación, para obtener dicho gráfico se procede al cálculo que se presenta a continuación en el que se encuentra la excitación necesaria en cada sector del circuito.

### 9.5.1 Características magnéticas del alternador didáctico en vacío y en carga

Ver Tabla adjunta.

TABLA 4. Características magnéticas del alternador didáctico en vacío y en carga

E por fase	20	40	60	80	100	120	140
$\hat{\phi} = \frac{m \cdot E}{2 \cdot 22fE1Z}$	$5.197 \times 10^{-5}$	$1.039 \times 10^{-4}$	$1.559 \times 10^{-4}$	$2.079 \times 10^{-4}$	$2.599 \times 10^{-4}$	$3.118 \times 10^{-4}$	$3.638 \times 10^{-4}$
$\hat{\phi}_\delta = K_f \cdot \hat{\phi}_\delta$	$5.093 \times 10^{-5}$	$1.018 \times 10^{-4}$	$1.527 \times 10^{-4}$	$2.037 \times 10^{-4}$	$2.547 \times 10^{-4}$	$3.056 \times 10^{-4}$	$3.565 \times 10^{-4}$
$\hat{\beta}_\delta = 1.57 \frac{\hat{\phi}}{tp L}$	0.012897	0.025778	0.038667	0.051582	0.064496	0.077386	0.090275
$\hat{\beta}_\delta = K_M K_L K_C \hat{\beta}_\delta$	0.013026	0.026036	0.039054	0.052098	0.065140	0.078159	0.091178
$\hat{B}'_d = K_{fex} K_{Mx} \hat{\beta}_\delta \frac{tp}{to}$	$3.4062 \times 10^{-3}$	$6.8084 \times 10^{-3}$	0.01021	0.01362	0.01703	0.02043	0.02384
$\hat{B}_y = \frac{\phi_\delta}{2S_y}$	0.01273	0.02545	0.038175	0.05093	0.06367	0.0764	0.08913
$\hat{H}_\delta = 0.8 \hat{\beta}_\delta$	0.01042	0.02083	0.03124	0.04168	0.05211	0.06253	0.07294
Hd	0.02	0.04	0.05	0.06	0.08	0.10	0.13
Hy	0.1	0.2	0.4	0.8	1.3	2.3	2.9
$\hat{\phi}_\delta = \hat{H} \cdot \delta$	10.42	20.83	31.24	41.68	52.11	62.53	72.94
$\hat{\phi}_d = \hat{H}_d \cdot ht$	0.08	0.16	0.20	0.24	0.32	0.40	0.52
$\hat{\phi}_y = \hat{H}_y \cdot ly$	1.4922	2.9844	5.9688	11.9376	19.3986	34.3206	43.2738
$\hat{\phi}_\delta + \hat{\phi}_d + \hat{\phi}_y$	11.9922	23.9744	37.4088	53.8576	71.8286	97.2506	116.7388
$\hat{\phi}_b = \hat{\phi}_C \hat{I}_{Sen \infty}$	268.5	268.5	268.5	268.5	268.5	268.5	268.5
$\hat{\phi}_P = \hat{\phi}_P \cdot a.P.C$	280.4922	292.4744	305.908	322.3576	340.3286	365.7506	385.2338
$\hat{\phi}_P = \hat{\phi}_P \Delta \hat{P} \times 10^{-8}$	$8.862 \times 10^{-6}$	$1.772 \times 10^{-5}$	$2.765 \times 10^{-5}$	$3.98 \times 10^{-5}$	$5.308 \times 10^{-5}$	$7.187 \times 10^{-5}$	$8.627 \times 10^{-5}$

TABLA 4. Continuación ...

E por fase	20	40	60	80	100	120	140
P.C							
$\phi\phi P = \phi\phi P \Delta \phi P \times 10^{-8}$	$2.072 \times 10^{-4}$	$2.161 \times 10^{-4}$	$2.260 \times 10^{-4}$	$2.3822 \times 10^{-4}$	$2.515 \times 10^{-4}$	$2.703 \times 10^{-4}$	$2.847 \times 10^{-4}$
vacío							
$\phi P = \phi P + \phi\phi P = \phi y$	$5.98 \times 10^{-5}$	$1.195 \times 10^{-4}$	$1.803 \times 10^{-4}$	$2.435 \times 10^{-4}$	$3.078 \times 10^{-4}$	$3.775 \times 10^{-4}$	$4.428 \times 10^{-4}$
P.C							
$\phi P = \phi\delta + \phi\phi P = \phi y$	$2.58 \times 10^{-4}$	$3.179 \times 10^{-4}$	$3.787 \times 10^{-4}$	$4.419 \times 10^{-4}$	$5.062 \times 10^{-4}$	$5.759 \times 10^{-4}$	$6.413 \times 10^{-4}$
vacío							
$\phi P = 1 + \phi\phi P$							
$\phi\delta$	1.174	1.174	1.18	1.18	1.20	1.23	1.24
BP = $\phi P$ vacío							
$\frac{SP}{SP}$	0.0906	0.1810	0.2732	0.3689	0.4663	0.5719	0.6709
BP = $\phi P$ P.C							
$\frac{SP}{SP}$	0.3909	0.4816	0.5738	0.6695	0.7669	0.8725	0.9716
Bn = $\phi y$ vacío							
$\frac{2Sn}{2Sn}$	0.0021	0.0042	0.0063	0.0085	0.0108	0.0133	0.0156
Bn = $\phi y$ P.C							
$\frac{2Sn}{2Sn}$	0.0090	0.0111	0.0133	0.0155	0.0178	0.0202	0.0226
HP vacío	3.2	4.5	5.5	6.5	8	9.8	11
HP P.C	6.8	8.2	9.2	11.5	15	19	22
$\phi P = HP$ LP vacío	23.04	32.4	39.6	46.8	57.6	70.56	79.20
$\phi P = HP$ LP P.C	48.96	59.24	66.24	82.8	108	136.8	158.4

TABLA 4. Continuación ....

E por fase	20	40	60	80	100	120	140
Hn vacío	0.01	0.03	0.06	0.09	0.12	0.18	0.22
Hn P.C	0.01	0.012	0.064	0.078	0.085	0.1	0.13
$\phi_n = HnLn$ vacío	0.0212	0.0636	0.1272	0.1908	0.2544	0.3816	0.4664
$\phi_n = HnLn$ P.C	0.0212	0.0254	0.1357	0.1654	0.1802	0.212	0.2756
$\phi_P + \phi_n$ vacío	23.0612	32.4636	39.7272	46.9908	57.8544	70.9416	79.6664
$\phi_P + \phi_n$ P.C	48.9812	59.0654	66.3757	82.9654	108.1802	137.012	158.6756
$\phi_M^b$ vacío	35.0534	56.438	77.136	100.8484	129.683	168.1922	196.4002
$\phi_M^b$ P.C	329.4734	351.5398	372.2837	405.323	448.5088	502.7626	543.9094

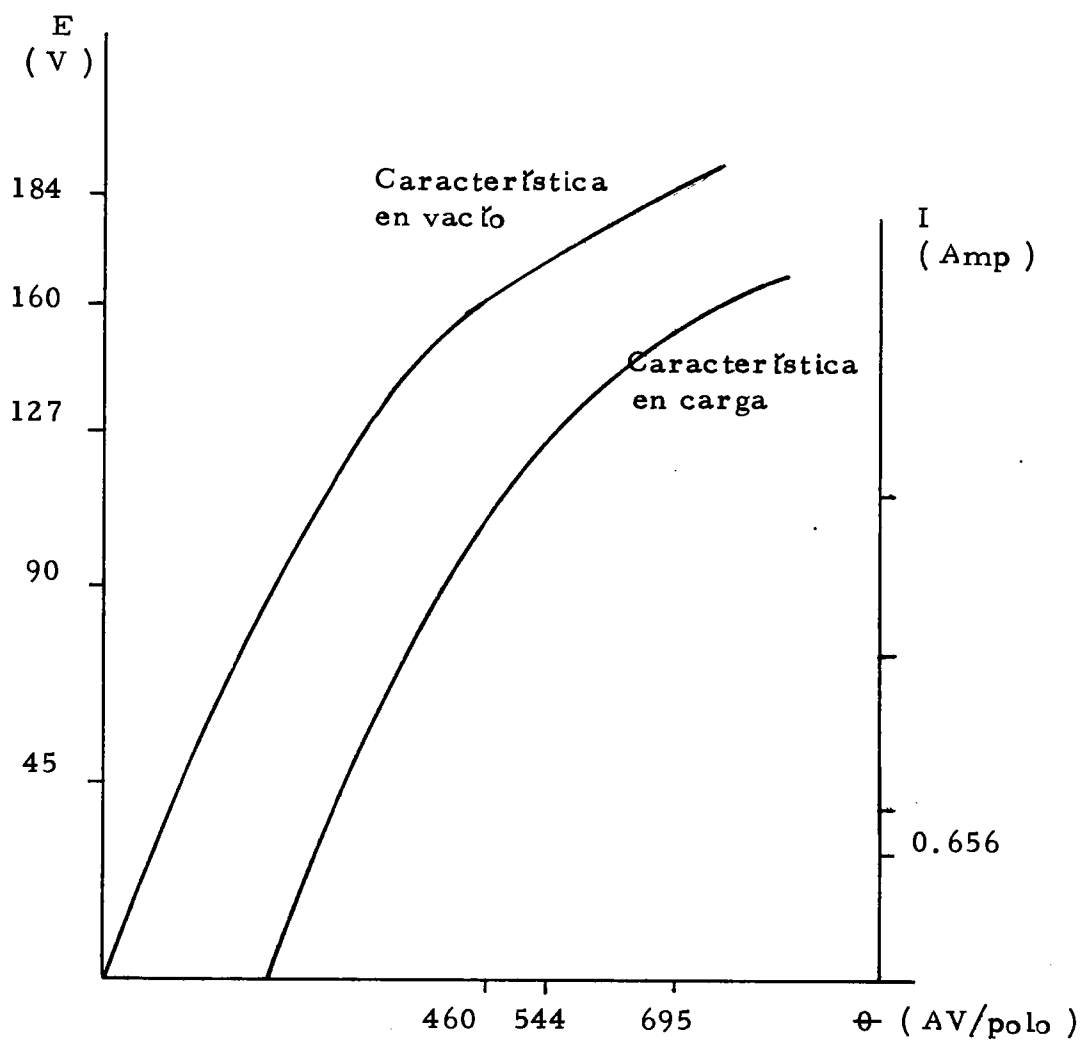


FIGURA 39. Característica de la máquina en vacío y en carga



## 9.6 BOBINAS POLARES

### 9.6.1 Selección del conductor

En la selección del conductor se deberá tener en cuenta la tensión nominal entregada por la excitatriz.

$$U'_{ex} = 15 \text{ V}$$

Se asume que la tensión disponible es del 90%, luego

$$U'_{ex} = 0.9 (15) \text{ voltios}$$

$$U'_{ex} = 13.5 \text{ voltios}$$

Para el circuito inductor se adopta, como se realiza en la mayoría de los generadores, una vía.

$$\alpha_{bp} = 1$$

La tensión de excitación que se requiere por bobina polar se puede obtener así:

$$U'_{bp} = \frac{U'_{ex}}{2p} \alpha_{bp} \text{ V/bobina polar}$$

$$U'_{bp} = \frac{13.5}{4} \times 1 \text{ V/bobina polar}$$

$$U'_{bp} = 3.37 \text{ V/bobina polar}$$

9.6.2 Cálculo de la bobina Se supone en base al diseño del polo que el grueso de la bobina polar es de:

$$g_{bp} = 2.0 \text{ cm}$$

Teniendo todas las dimensiones del polo se determina la longitud media de la espira.

$$l_{mp} = 2 ( L_{np} + b_{np} + 0.8 ) = \pi g_{bp} ( \text{cm} )$$

$$l_{mp} = 2 ( 2 + 3.3 + 0.8 ) + \pi \times 2 ( \text{cm} )$$

$$l_{mp} = 18.4 \text{ cm}$$

Los valores utilizados son tomados del diseño del polo. Nótese que 0.8 cm son debidos al espesor de aislamientos y formaleta de la bobina.

La excitación total a plena carga  $\Phi_{bp}$  necesaria, considerando un 8% de imprevistos, es:

$$\Phi_{bp} = 536.66 \times 1.08$$

$$\Phi_{bp} = 579.52 \text{ AV/bobina polar}$$

Esta excitación total a plena carga  $\Phi_{bp}$  resulta de la adición del flujo para el circuito magnético y el flujo resultante de la f.e.m. a plena carga.

Se está en capacidad de fijar el valor de la sección del conductor.

$$S_{bp} = \frac{\rho \cdot l_{mp} \cdot \Phi_{bp}}{U'_{bp}}$$

$$S_{bp} = \frac{0.0172 \times 0.184 \times 579.52}{3.37}$$

$$S_{bp} = 0.544 \text{ mm}^2$$

La corriente de excitación por bobina es, teniendo en cuenta una densidad de corriente de 1.5 A/mm<sup>2</sup>

$$\Delta_{bp} = 1.5 \text{ A/mm}$$

$$I_{bp} = \Delta_{bp} \times S_{bp} \quad (A)$$

$$I_{bp} = 1.5 \times 0.544 \quad (A)$$

$$I_{bp} = 0.816 \text{ A}$$

Por tal motivo seleccionamos un conductor #20 que tiene un diámetro  $\phi = 0.7989 \text{ mm}$  y una sección  $S = 0.6529 \text{ mm}^2$

El número de espiras por bobina es directamente proporcional a la excitación a plena carga e inversamente proporcional a la corriente de excitación por bobina.

$$N_{bp} = \frac{\Phi_{bp}}{I_{bp}} \text{ espiras}$$

$$N_{bp} = \frac{536.66}{0.816}$$

$$N_{bp} = 657.67 \text{ espiras}$$

Adoptamos 670 espiras

Debido a que hay una sola vía en el circuito inductor, la corriente total de excitación es:

$$I_{exc} = \mathcal{C}_{bp} \times I_{bp} \text{ Amp}$$

$$I_{exc} = 1.0 \times 0.816 \text{ Amp}$$

$$I_{exc} = 0.816 \text{ Amp}$$

#### 9.6.3 Cálculo de resistencia óhmica

Para calcular la resistencia óhmica, asumimos 70 espiras por capa, encontrando así la altura de la bobina "hbp" efectuando el mismo procedimiento que para el estator.

$$hbp = N \text{ espiras/capa} \times \phi_{cu}$$

$$hbp = 70 \times 0,7989$$

$$hbp = 56 \text{ mm}$$

El número de capas es:

$$N_c = \frac{N \text{ espiras}}{N \text{ espiras/capa}} = \frac{670}{70}$$

$$N_c = 9.57 \text{ capas}$$

Adoptamos 10 capas

La Figura 40 muestra las dimensiones de las bobinas polares.

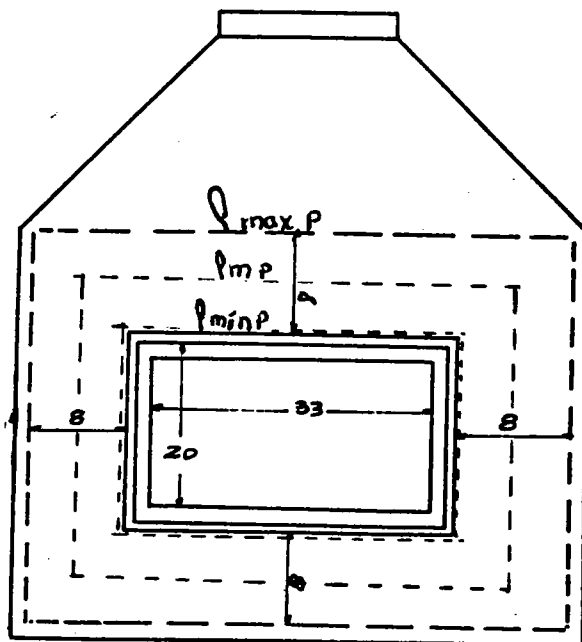


FIGURA 40. Dimensiones de las bobinas polares

El espacio ocupado por las 10 capas es:

$$\text{Espacio ocupado} = \phi_{cu} \times N_c \times 1.1$$

$$\text{Espacio ocupado} = 0.7989 \times 10 \times 1.1$$

$$\text{Espacio ocupado} = 8 \text{ mm}$$

Longitud de la espira mínima

$$l_{minp} = 2 ( 20 + 8 + 2 + 33 + 8 + 2 ) \text{ mm}$$

$$l_{minp} = 2 ( 76 ) \text{ mm}$$

$$l_{minp} = 152 \text{ mm}$$

Longitud de la espira máxima

$$l_{maxp} = 2 ( 20 + 8 + 2 + 16 + 33 + 8 + 2 + 16 ) \text{ mm}$$

$$l_{maxp} = 2 ( 105 ) \text{ mm}$$

$$l_{maxp} = 210 \text{ mm}$$

Longitud de la espira media

$$l_{mp} = \frac{l_{minp} + l_{maxp}}{2}$$

$$l_{mp} = \frac{152 \text{ mm} + 210 \text{ mm}}{2} = 181 \text{ mm}$$

$$l_{mp} = 181 \text{ mm}$$

Con lo cual estamos verificando el cálculo hecho anteriormente, para la longitud de la espira media.

La resistencia media por bobina polar es:

$$R_{bp} = \frac{\rho \cdot l_{mp} \times N_{bp}}{S_{bp}}$$

$$R_{bp} = \frac{0.0172 \times 0.181 \times 670}{0.4105}$$

$$R_{bp} = 5 \Omega/\text{polo}$$

La resistencia total del devanado inductor es:

$$i_{nd} = 5 \times 4$$

$$i_{nd} = 20 \Omega$$

#### 9.6.4 Pérdidas y calentamiento de las bobinas inductoras

Las pérdidas totales que se presentan en las bobinas son:

$$P_{ex} = U'_{ex} \cdot I_{exc} \text{ w}$$

$$P_{ex} = 13.5 \times 0.816 \text{ w}$$

$$P_{ex} = 11,01 \text{ w}$$

La pérdida ocurrida en cada bobina es:

$$P_{bp} = \frac{P_{ex} \cdot w}{2p}$$

$$P_{bp} = \frac{11,01}{4}$$

$$P_{bp} = 2,754 \text{ w}$$

## 9.7 DEFINICION DE ALTURA RADIAL TOTAL DE POLO

Es la longitud total del polo, incluyendo la zapata polar y se define como la sumatoria de la altura radial del núcleo polar y la altura de la zapata polar.

### 9.7.1 Altura radial del núcleo polar

Es la sumatoria de la longitud del núcleo polar y los aislamientos. Aquí se tiene en cuenta dejar el espacio necesario para aislamientos y la formaleta que consideramos de 0.8 mm

$$h_{np} = h_{bp} + 0.8 \text{ mm}$$



Teniendo entonces:

$$hnp = 5.6 \text{ cm} + 0.8 \text{ cm}$$

$$hnp = 6.4 \text{ cm}$$

Se suma ahora el valor de la altura de la expansión polar en el centro del polo "ho" ( cm ) En nuestro caso

$$ho = 0.8 \text{ cm}$$

Teniendo este valor podemos saber la longitud total de cada polo, la cual será:

$$hp = hnp + ho$$

$$hp = 6.4 \text{ cm} + 0.8 \text{ cm}$$

$$hp = 7.2 \text{ cm}$$

## 10 . CONSTRUCCION DEL ALTERNADOR

### DIDACTICO

A continuación se describen los materiales que fueron empleados en la construcción del alternador didáctico así como los planos de cada una de las piezas .

#### 10.1 ESTATOR

##### 10.1.1 Corona

En su fabricación se utilizó acero fundido con la siguiente composición química:

Carbono combinado	0.25%
Silicio	0.20%
Manganeso	0.50%
Fósforo	0.08%
Azufre	0.05%

Este material nos asegura el funcionamiento adecuado de la máquina para los fines perseguidos. Para su maquinación se hizo necesaria la utilización de un torno, cepillo y fresadora.

La corona tiene las siguientes dimensiones:

Diámetro exterior	387 mm
Diámetro interior	330 mm

Además está provista de perforaciones de diámetro 5/16" simétricamente ubicadas de tal manera que permitan disponer los polos del estator para un funcionamiento como alternador monofásico, utilizando cuatro polos, o como trifásico utilizando tres polos a 120° exactos uno del otro.

Las dimensiones y la forma son especificadas en la Figuras 41 y 42

#### 10.1.2 Polos

##### 10.1.2.1 Núcleo

El material utilizado para la construcción de los núcleos es acero fundido de la misma composición química descrita anteriormente.

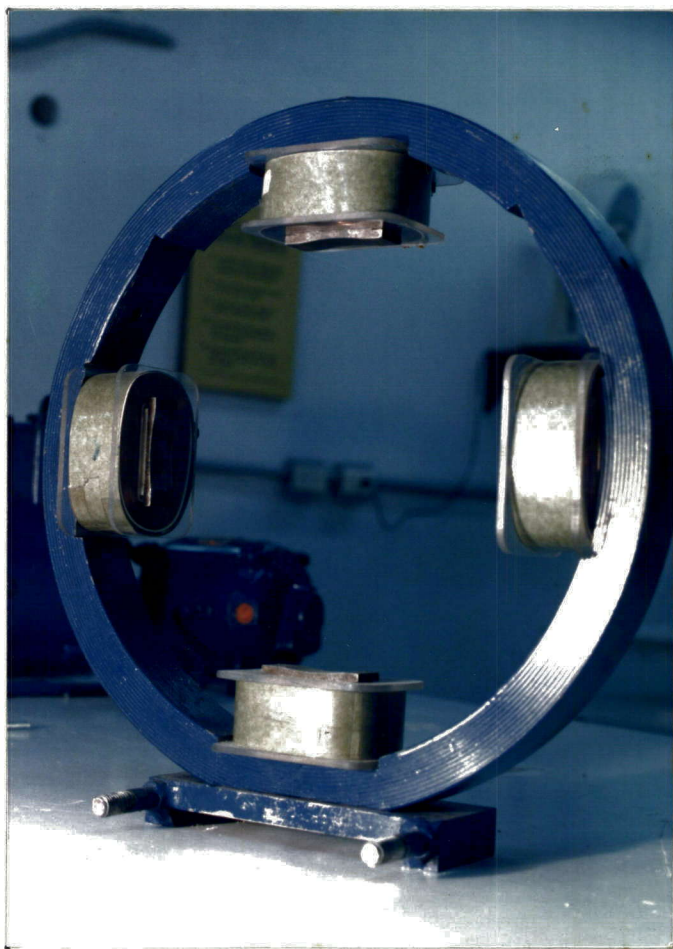


FIGURA 41 . Forma del estator

Los polos se confeccionaron con pines que permiten la fijación de estas partes de la corona.

Cada núcleo está provisto de espárragos de  $5/16" \times 3"$  que permiten fijarlo a la corona y sujetarlo exteriormente mediante una tuerca fabricada en bronce fosforado que es operada mediante una llave especial que forma parte de los accesorios del equipo. La dimensiones y forma son especificadas en la Figuras 43 y 44.

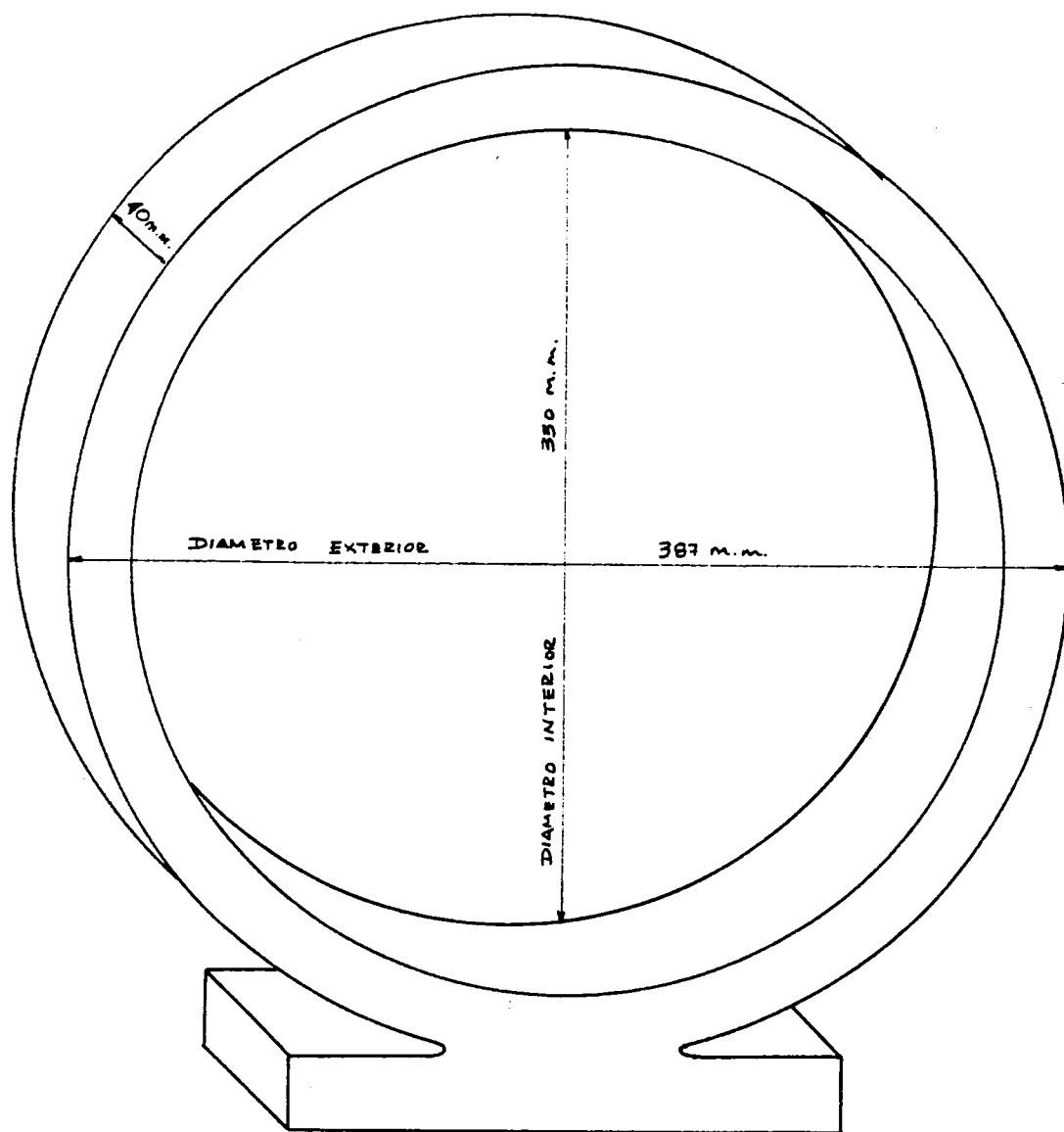


FIGURA 42 . Forma de la corona estática

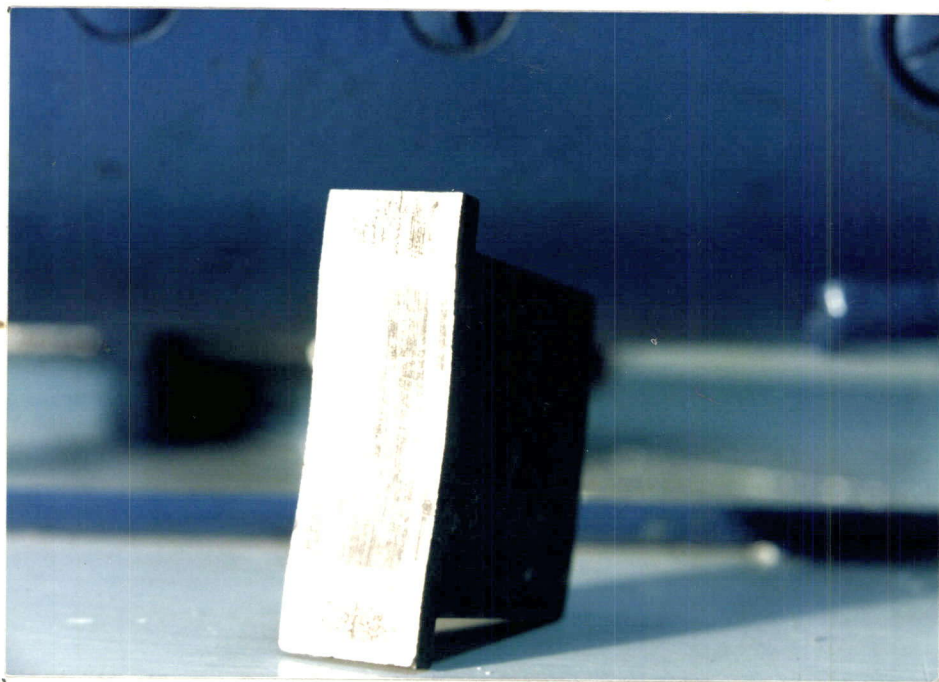


FIGURA 43 . Forma de los polos estáticos

#### 10.1.2.2 Bobinados

Se diseñaron tomando como base las dimensiones de los núcleos y el diseño eléctrico. El cuerpo externo de la bobina fué construido en lámina de acrílico de 4 mm de espesor. Los cálculos se basaron teniendo en cuenta la forma y características del núcleo.

El devanado está constituido de alambre esmaltado TD #25 y posee 1700 espiras simétricamente repartidas en capas. Entre el cuerpo exterior y la parte activa de la bobina se utilizó como aislamiento papel prespan de 1 mm de espesor y barniz dieléctrico. La forma y dimen-

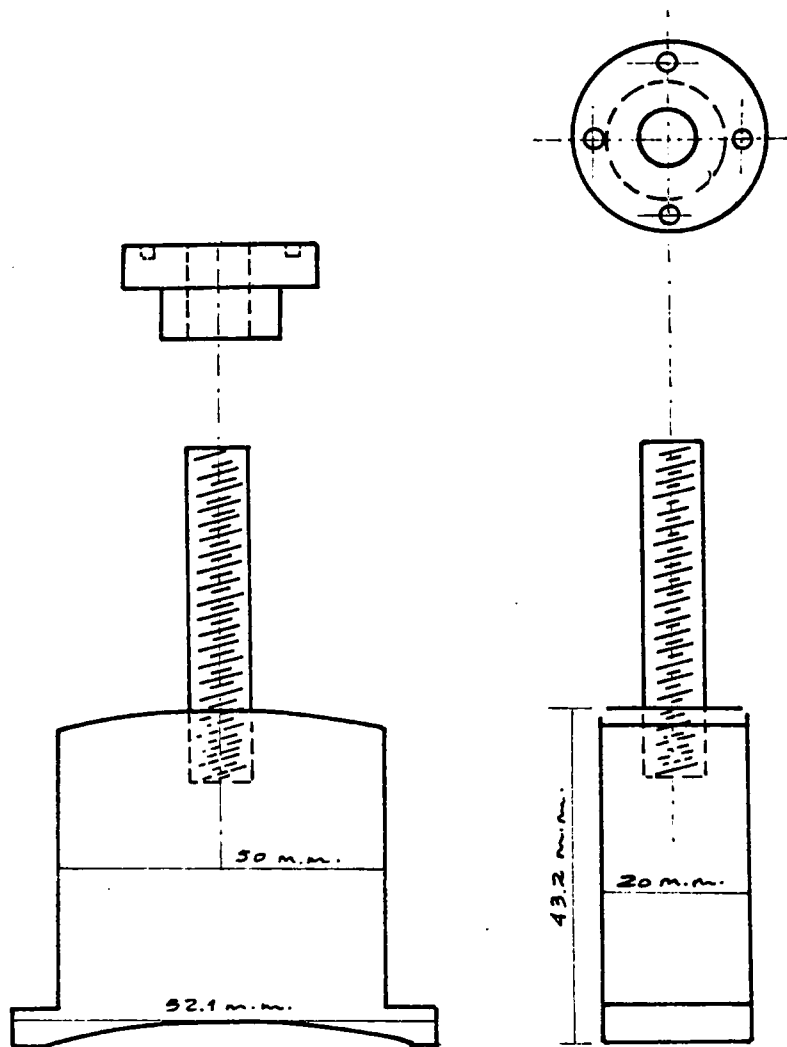


FIGURA 44 . Forma y dimensiones de los polos estáticos

siones se especifican en la Figuras 45 y 46.

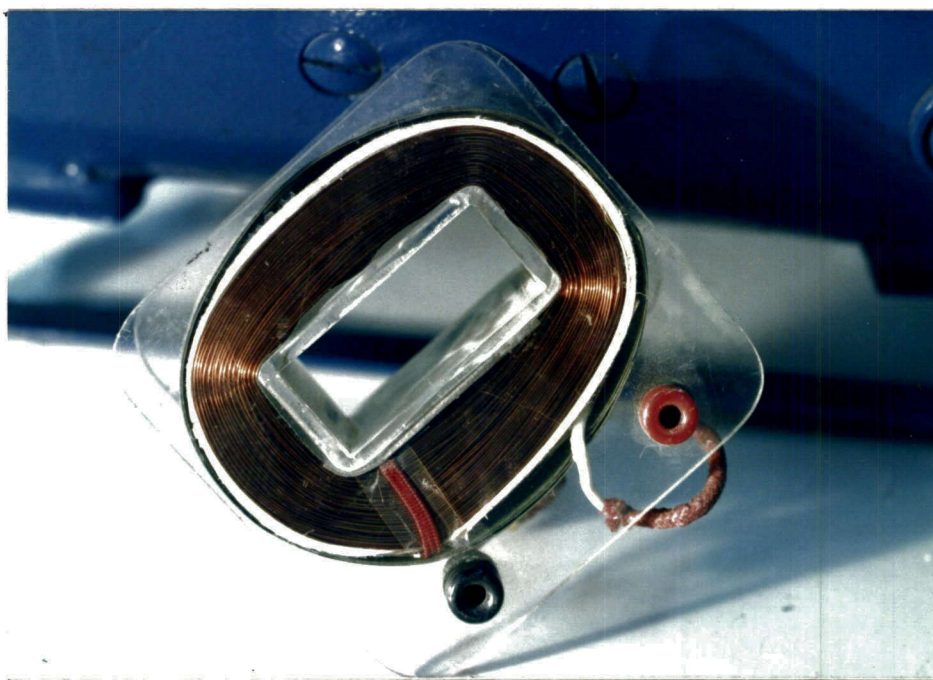


FIGURA 45 . Forma de una bobina estat3rica

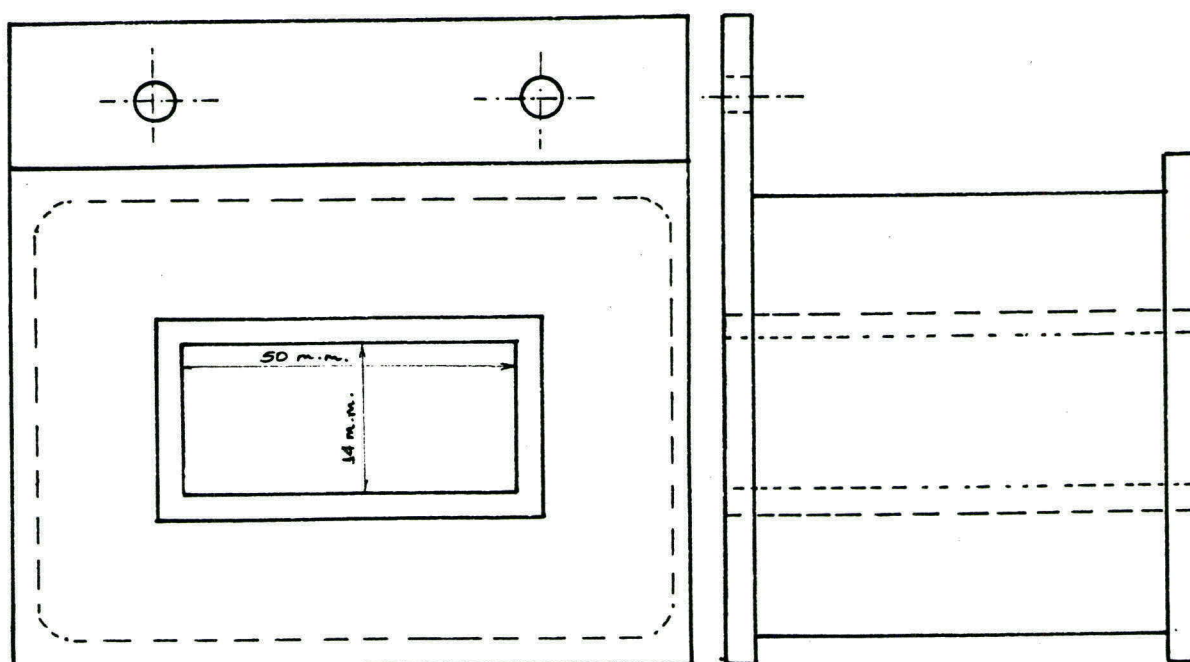


FIGURA 46 . Formas y dimensiones de las bobinas estat3ricas



## 10.2 ROTOR

### 10.2.1 Núcleo

Al igual que el estator debería estar formado por chapas debidamente prensadas pero atendiendo el objetivo propuesto con el equipo y en vista de las dificultades que esto implicaba en la fabricación se llevó a cabo en una pieza maciza de acero fundido. El rotor mecánicamente está constituido por tres partes claramente diferenciadas.

#### 10.2.1.1 Cuerpo

Posee dos núcleos o polos rotóricos fijos a su estructura y dos guías en cola de milano que permiten la fijación de los otros dos polos restantes. En su centro existe un orificio de 5/8" en el cual se introduce el eje del equipo sujeto con una cuña que permite que la rotación de la máquina motriz se transmita al rotor. ( Ver Figuras 47 y 48 ).

#### 10.2.1.2 Núcleos rotóricos

La otra parte está construida por dos núcleos rotóricos independientes que pueden ser colocados o retirados del cuerpo cuando la práctica a realizar así lo requiera. Se fijan al cuerpo mediante guías en cola de milano y cuando se montan a la máquina poseen dos accesorios

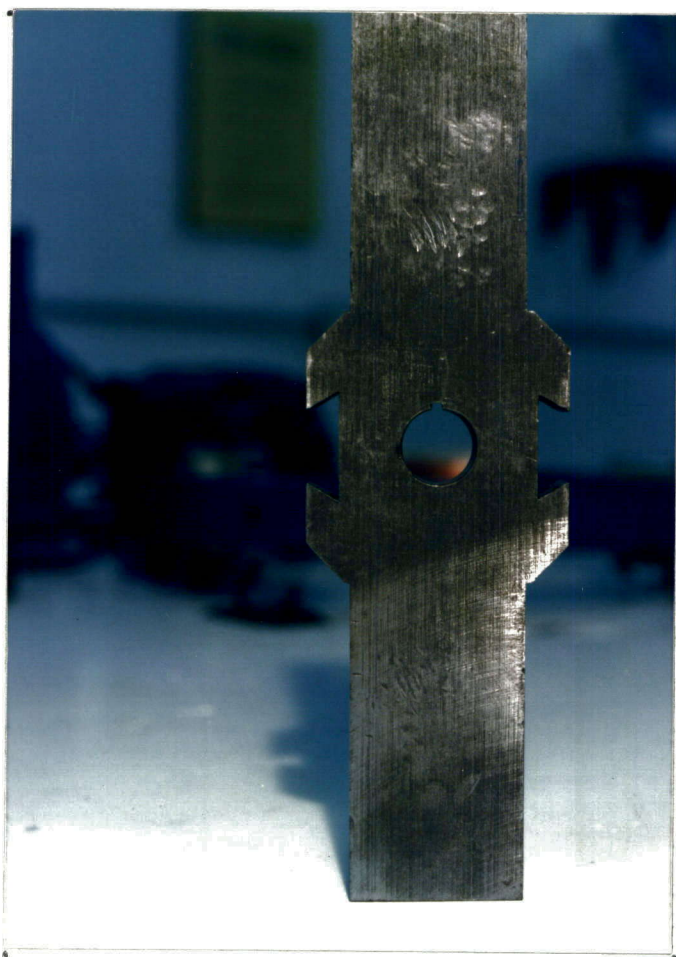


FIGURA 47 . Cuerpo del rotor

en forma de arandelas que evitan que cuando se gire a una velocidad grande por efectos de la fuerza centrípeta se vayan a salir del campo.

#### 10.2.1.3 Zapatas polares

Son fabricadas en acero fundido. Poseen cuatro orificios simétricamente distribuidos para fijarse a los núcleos rotóricos por medio de tornillos  $3/16'' \times 3/4''$  y así evitar que las bobinas se salgan de sus

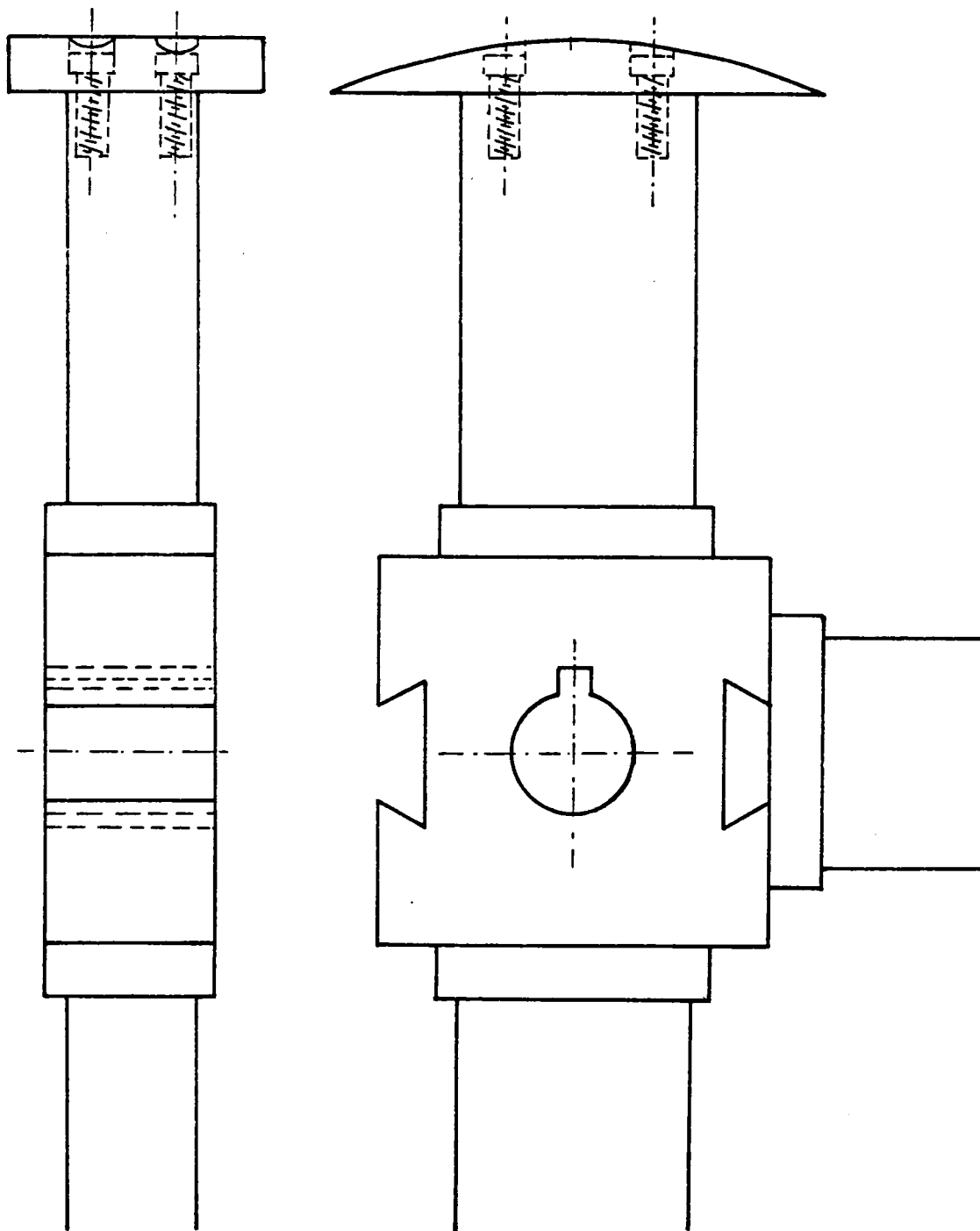


FIGURA 48 . Forma del cuerpo del rotor

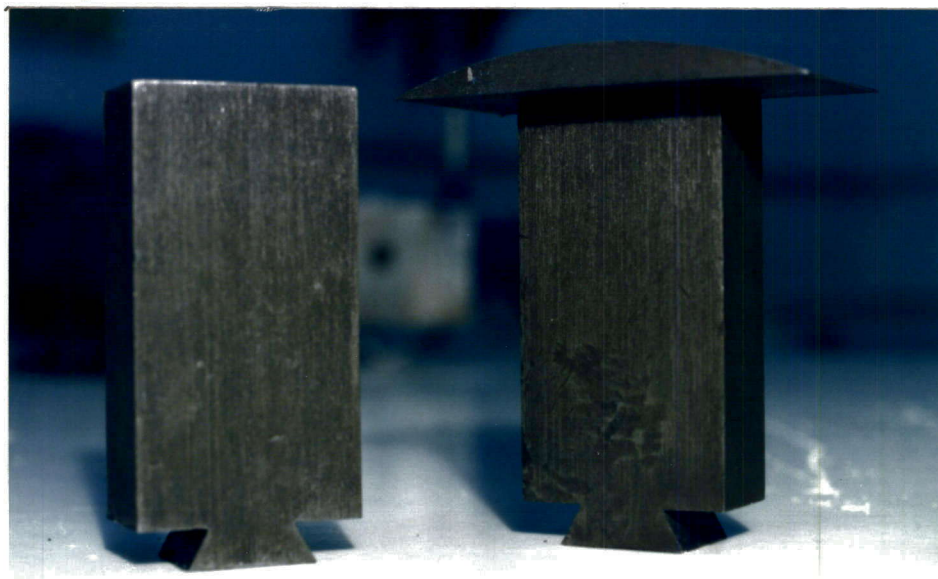


FIGURA 49 . Núcleos rotóricos sin zapata polar y con zapata polar

núcleos cuando el rotor se ponga en funcionamiento. La forma y dimensiones se especifican en la Figuras 49, 50 y 51.

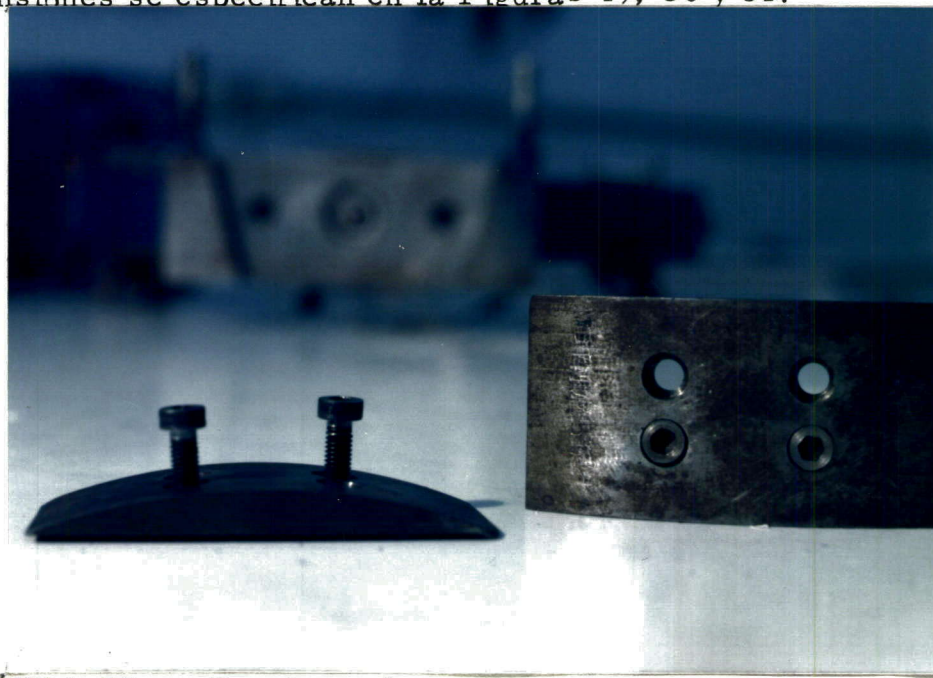


FIGURA 50 . Zapatas polares

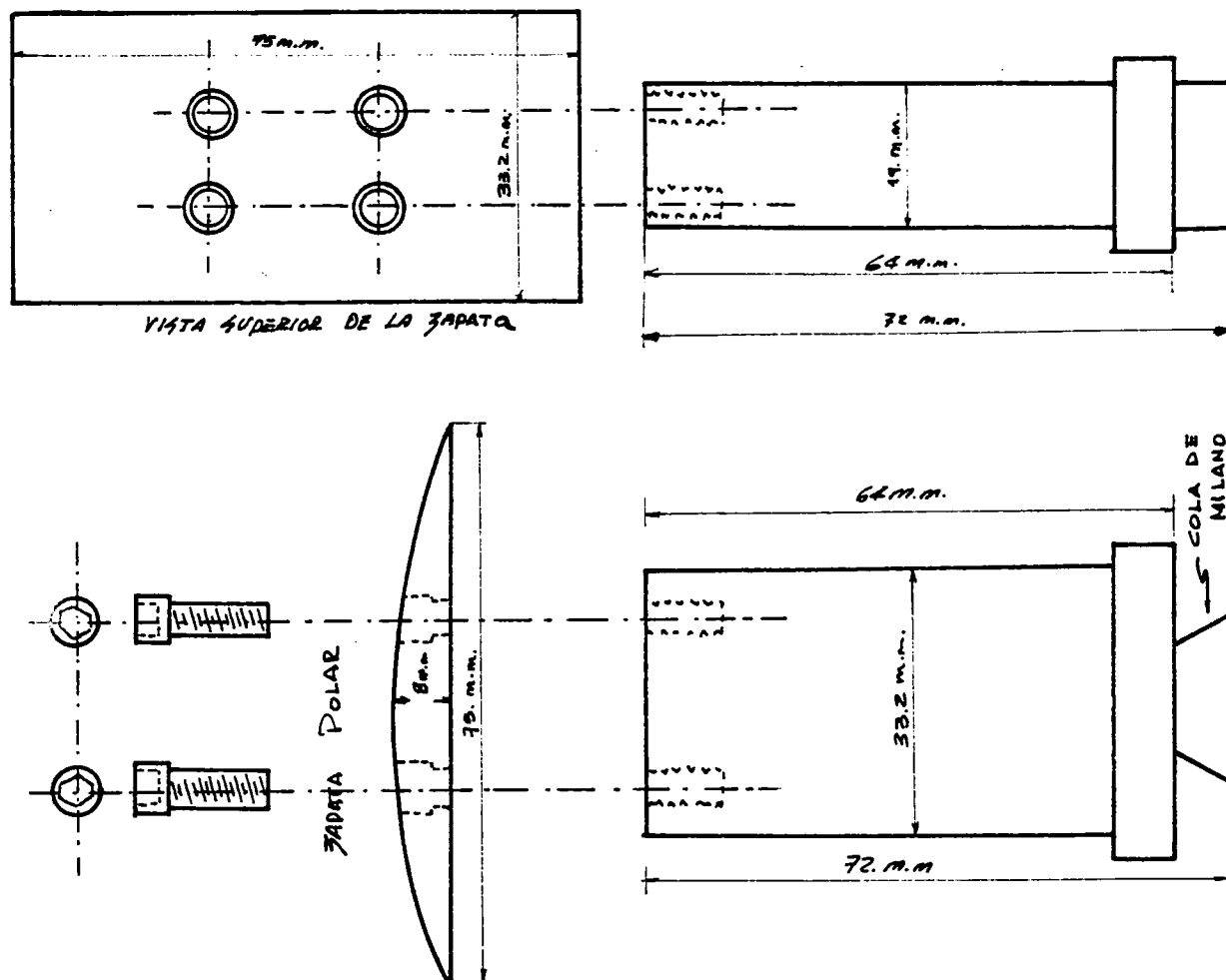


FIGURA 51 . Forma y dimensiones de los polos rotóricos

#### 10.2.2 Bobinados

Igualmente que los bobinados del estator el cuerpo exterior o formale-  
ta está hecho en acrílico de 4 mm de espesor. El devanado fué fabri-  
cado con alambre de cobre TD #21 esmaltado con 673 espiras por cada

bobina. Su forma se especifica en la Figura 52.

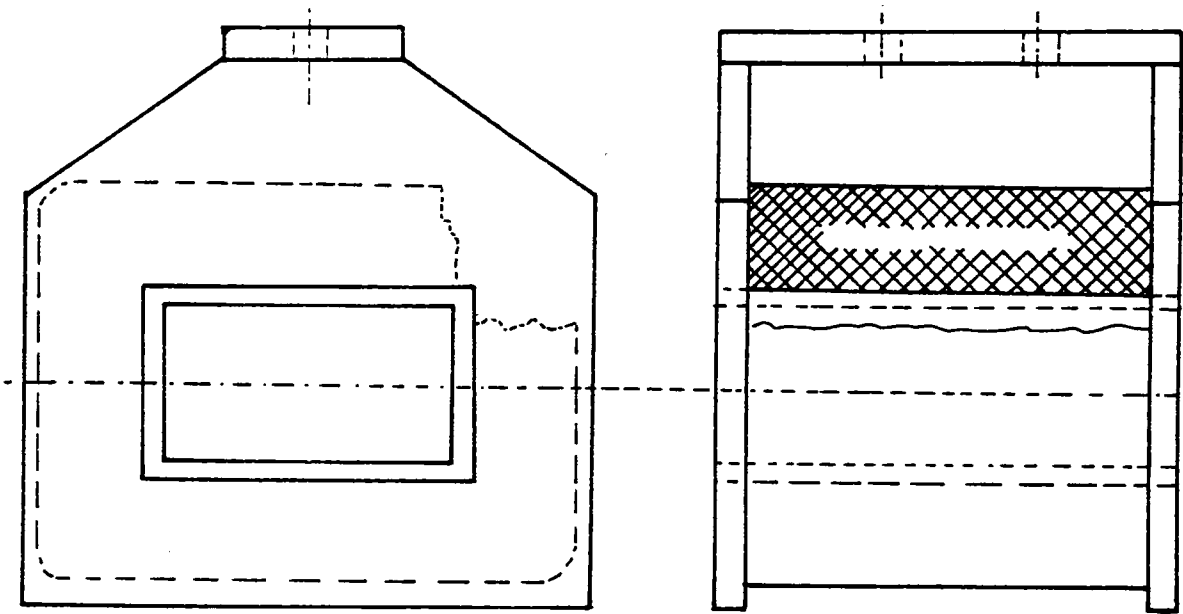


FIGURA 52 . Forma de la bobina rotórica

### 10.3 EJE

Se construyó de una barra de acero calibrado de  $5/8''$  de diámetro. En un extremo estará el dispositivo de acople con la máquina motriz, le siguen los rodamientos separados convenientemente para darle firmeza al equipo en funcionamiento, luego encontramos la cuna para los anillos rozantes y finalmente el espacio para el rotor. En este extremo, el del rotor, se practicó una rosca interior en el centro para disponer de un tornillo de presión que fije el cuerpo del rotor; también se elaboraron cuñeros en los sitios necesarios para evitar deslizamiento de

las piezas que deben girar con el eje. La forma se muestra en la Figura 53.

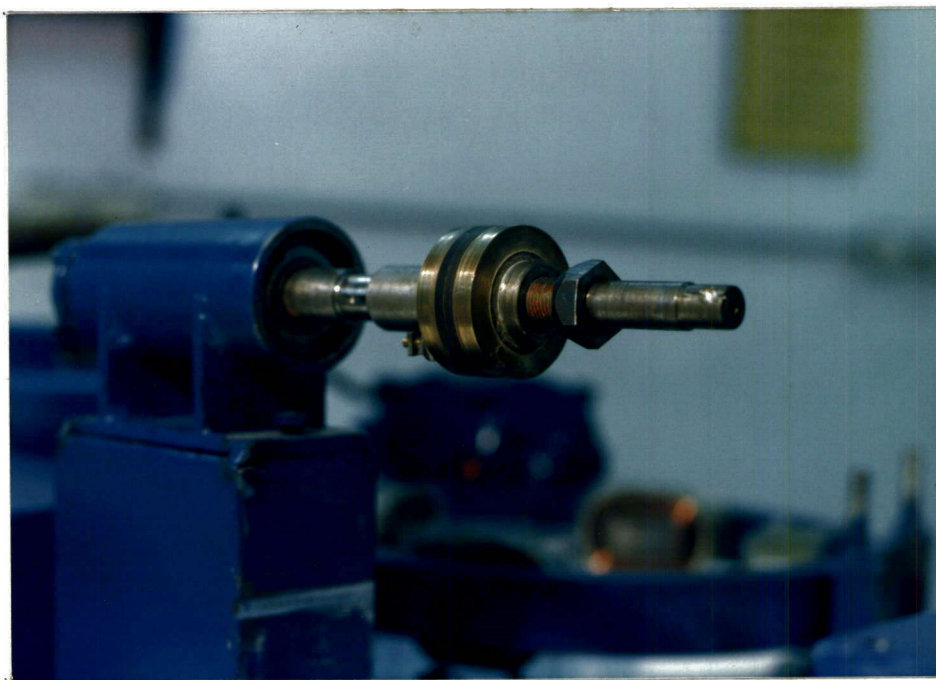


FIGURA 53 . Forma del eje

#### 10.4 DISPOSICION DE ACOPLE

Para efectos de acople, esta pieza cumple una función muy importante, por lo cual su ensamble debe hacerse con mucho cuidado, prestando atención a que la línea de su respectivo eje quede perpendicular al plano de sus caras; esto ayudará a tener una perfecta alineación en los montajes. Por su parte, el acople posee un elemento en forma de cruz de caucho, a manera de amortiguador para limitar los



golpes reproducidos en los impulsos del arranque. Cada medio acople posee un tornillo prisionero para asegurarlo una vez se compruebe que están bien instalados de modo que la línea del árbol coincida con la del acople. La forma se presenta en la Figura 54.

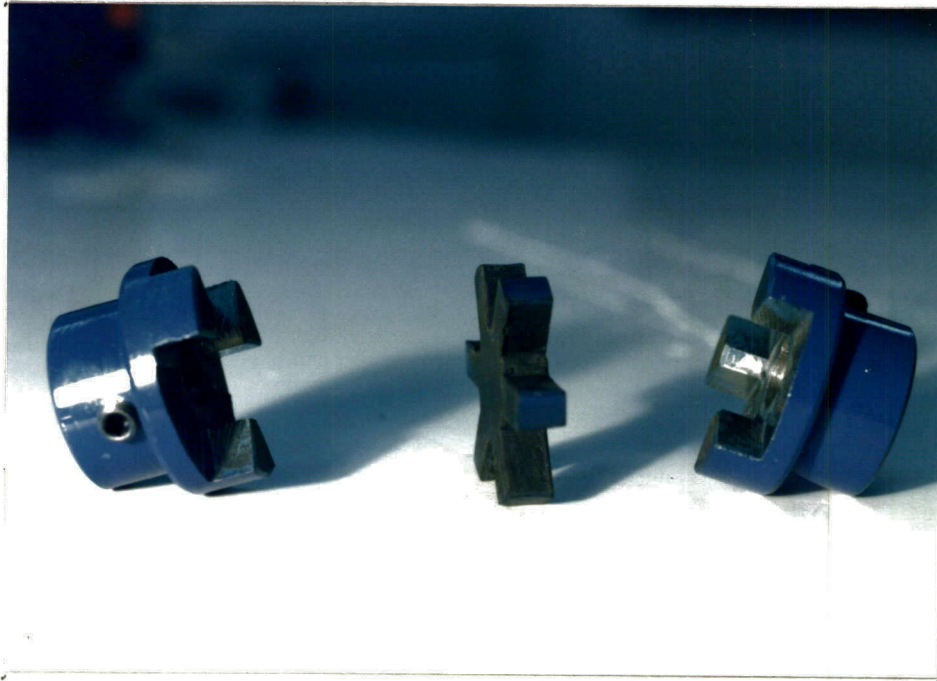


FIGURA 54 . Forma del dispositivo de acople

#### 10.5 ANILLOS ROZANTES

Constituyen una parte fundamental para el funcionamiento del alternador: son el medio de conexión entre la fuente de alimentación o excitatriz y el circuito del inducido. Están contruïdos en bronce latón pa-



ra garantizar una buena conducción de la corriente para aislarlos del eje. Su cuerpo interno está fabricado en bakelita, que es un material aislante y tiene gran resistencia mecánica.

Los terminales de cada anillo están aislados internamente uno del otro; externamente se conectan directo a los terminales del inductor.

La forma se presenta en la Figura 55.

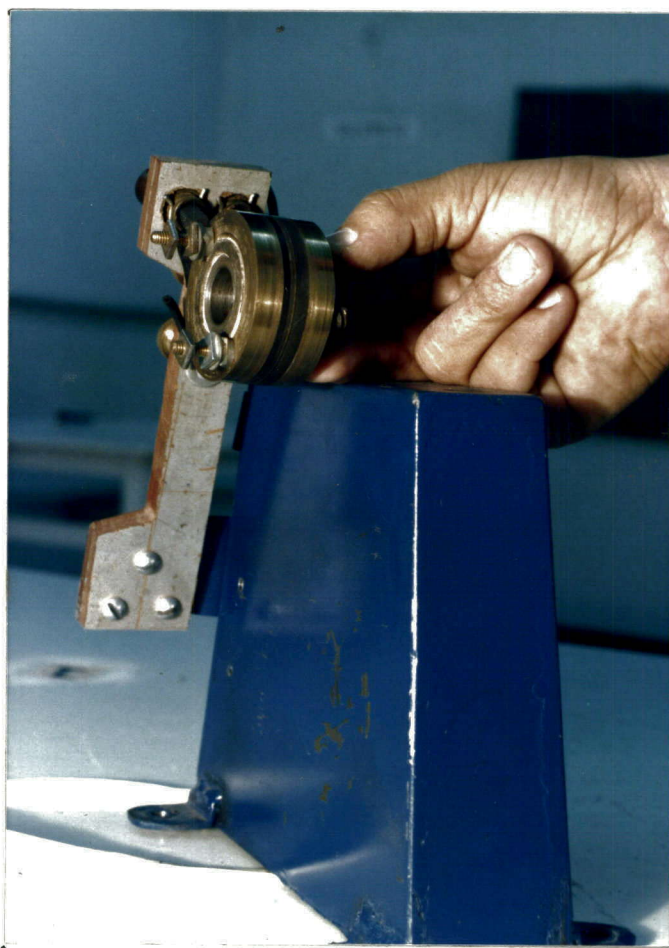


FIGURA 55 . Forma de los anillos rozantes

## 10.6 ESCOBILLAS

Se utilizan escobillas de carbón debido a que son blandas y no desgastan los anillos. Este tipo de escobillas es muy comercial, se lubrican por sí mismas ya que contienen una pequeña cantidad de grafito. Tienen una posición fija sobre los anillos por medio de un porta escobillas sujeto con pernos a la máquina. Un resorte graduable mantiene una presión constante entre las escobillas y los anillos. La forma se muestra en la Figura 56.

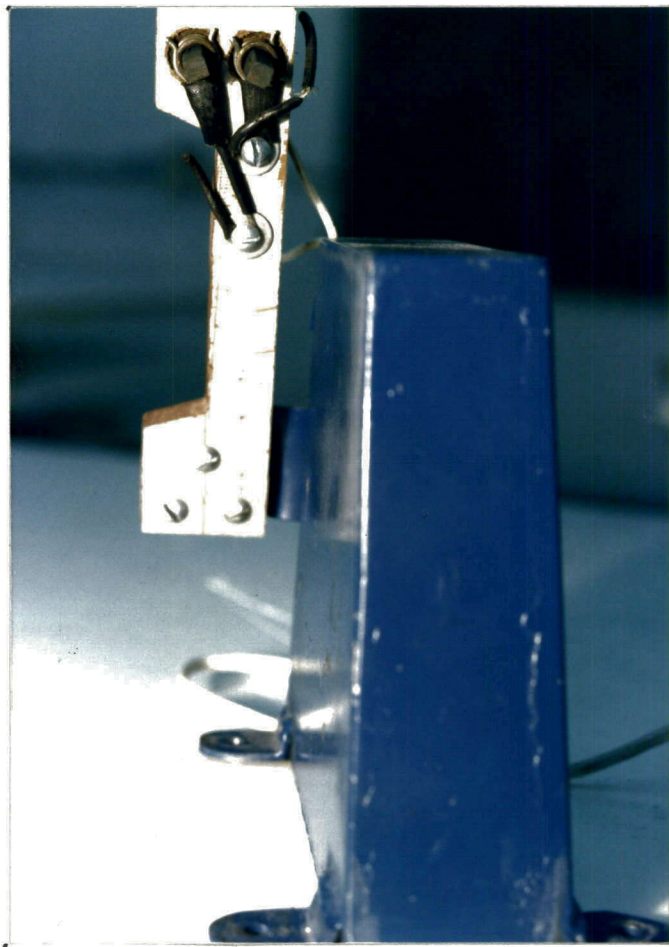


FIGURA 56 . Forma de las escobillas

## 10.7 RODAMIENTOS

Se seleccionaron chumaceras de referencia Koyo 6204 especiales para soportar el eje en forma horizontal. Están ubicadas sobre dos pedestales ubicados a la misma altura para que no exista diferencia de altitud entre ellas y el eje quede perfectamente horizontal. En su parte superior posee cada una una graser para su lubricación. La forma se especifica en la Figura 57.

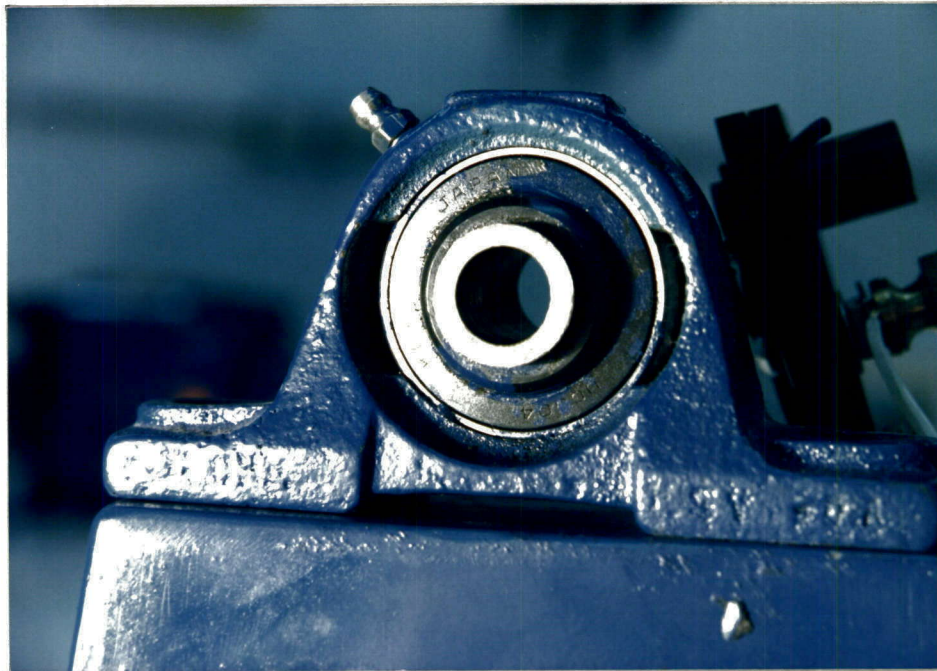


FIGURA 57 . Fotografía de los rodamientos utilizados

## 10.8 MAQUINA MOTRIZ

En las grandes plantas de generación de energía eléctrica se utilizan diferentes métodos para accionar los alternadores, dependiendo de las múltiples condiciones que se requieran para el montaje. Estas condiciones pueden ser de orden económico, ambiental, topográfico, etc.

Los sistemas tradicionales de impulsión y los más utilizados son: turbinas hidráulicas, turbina de vapor, en las grandes plantas. En las pequeñas plantas de generación eléctrica se utilizan motores a los cuales se les puede variar fácilmente su velocidad. En este caso utilizaremos un motor de corriente continua, ya que presenta entre sus características más importantes la de variación de la velocidad en un amplio margen. Las características de placa del motor de corriente continua son:

Marca: ICO; HP:  $3/4$ ; Amp DC: 4; conexión compuesta: VDC campo  
220 V; n de 2900 RPM

Hay tres procedimientos comunes para la regulación de la velocidad del motor de corriente continua:

- Modificando el flujo mediante un reóstato de campo en el circuito

del devanado derivación.

- Ajustando la resistencia del circuito del inducido
- Variando la tensión en bornes del inducido

El método utilizado en este caso es el de reóstato en el circuito de devanado de derivación. El ajuste de la corriente de excitación por consiguiente del flujo y la velocidad, se hace variando conescuentemente la resistencia del circuito de derivación. La velocidad mínima que se obtiene corresponde al campo máximo o sea anulando totalmente la resistencia del reóstato, la máxima está limitada por los efectos de reacción del inducido ya que cuando el campo es muy débil se presenta inestabilidad. En nuestro proyecto se utilizó un reóstato de 300 , 300 w, 1 A. ( Ver Figura 58 ).

Los circuitos de conexión del motor se muestran en la Figura 59

## 10.9 EXCITATRIZ

En este caso utilizaremos un generador de corriente continua conexión shunt con las siguientes características de placa:



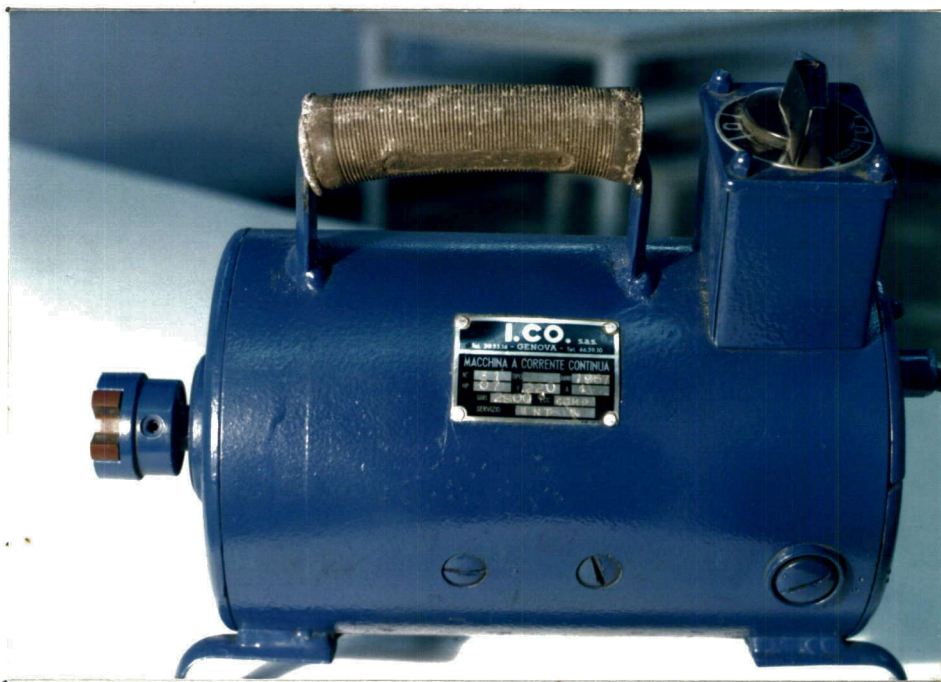


FIGURA 58 . Máquina motriz

Marca: General Electric

HP : 1.8

Amp DC : 0.6 A

Conexión derivación: VDC : 250 V

n : 1725 RPM

( Ver Figuras 59 y 60 ).

#### 10.10 BASE GENERAL O PEDESTAL

Se construyó en lámina de 1/2" de espesor con las siguientes dimensiones: 100 cm de largo por 25 cm de ancho. Se midieron las alturas

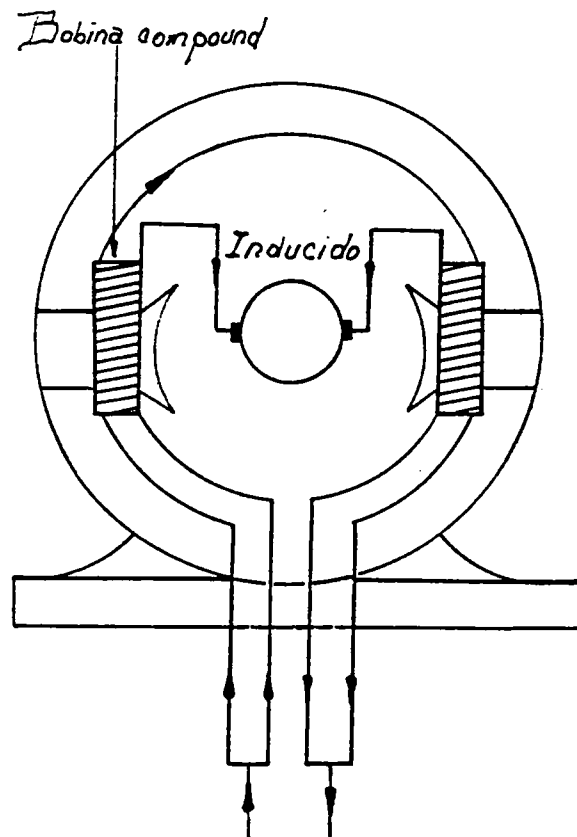


FIGURA 59 . Conexiones internas del motor

de las máquinas en los extremos hasta conseguir que la línea axial del árbol del alternador coincida con el eje del motor de corriente continua la excitatriz y que a la vez coincida con el centro geométrico de la corona estatórica. Las bases para estos elementos se fabricaron en la lámina de  $1/4''$  de espesor ( Ver Figura 61 ).

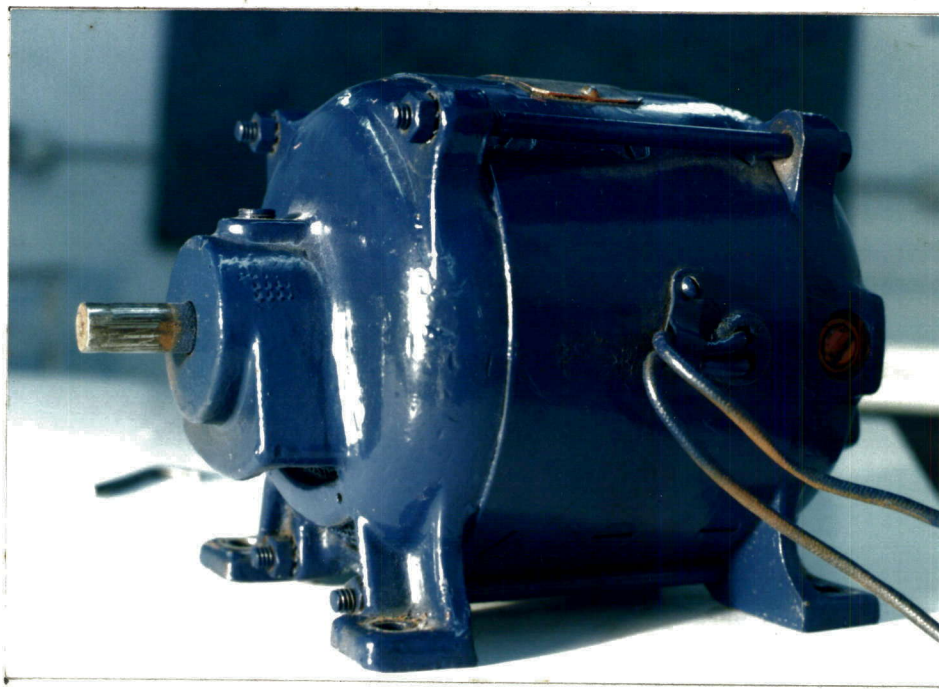


FIGURA 60 . Excitatriz

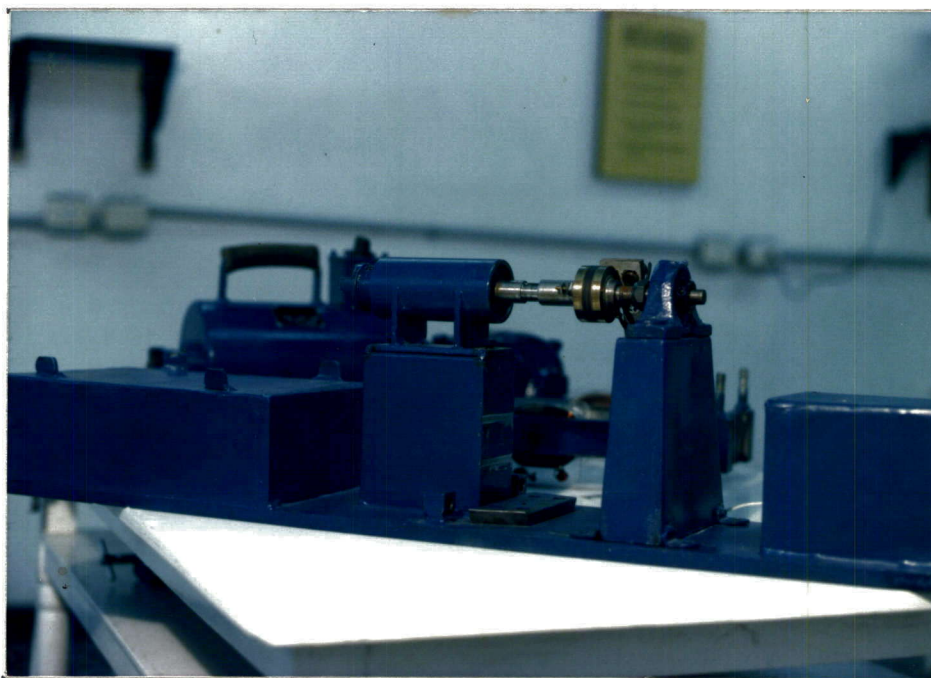


FIGURA 61 . Base del alternador didáctico



## 11. CONCLUSIONES

Diseñar y calcular una máquina eléctrica para luego llevarla a la práctica, es de esperar que al hacer funcionar la máquina una vez construida sus características y parámetros no se ajusten con toda exactitud a lo teórico, pues resulta difícil conocer con precisión el comportamiento de los materiales empleados en su fabricación, porque hay agentes externos que influyen en sus características.

Al hacer el cálculo teórico es natural hacer uso de tablas, curvas y gráficas construidas en base a muchísimas experiencias en laboratorios especializados de investigación de máquinas, como también de la experiencia de máquinas ya construidas y a veces hacer uso de suposiciones e hipótesis que luego son ajustadas o confirmadas durante el desarrollo del cálculo.

Del diseño y construcción del alternador didáctico podemos sacar las siguientes conclusiones:

1. El bobinado del estator puede ser recorrido por una corriente eléctrica, basta que esté sujeto a una variación de imantación. Estas variaciones de imantación pueden producirse por el desplazamiento de un imán permanente o bien por el desplazamiento de un electroimán cuyo enrollamiento es recorrido por corriente continua, o también por la rotación de éste electroimán recibiendo el nombre de inductor.

Como consecuencia de lo anterior, una corriente recorre la bobina estatórica tanto en un sentido como en otro, variando en todo instante. Esta corriente es denominada corriente alterna.

2. El aumento de intensidad de corriente en el inductor, denominada también corriente de excitación, produce un aumento de imantación que se traduce en un aumento de tensión.

Si se aumenta el número de bobinas en el estator, se está incrementando el número de espiras y por consiguiente la tensión en los bornes del conjunto estatórico también aumenta.

Entonces, se puede afirmar que se obtiene un aumento de la tensión en el estator, cuando se aumenta la corriente de excitación o cuando se aumenta el número de espiras en el estator.

En la práctica el inductor está alimentado con corriente continua producida por una fuente externa o una excitatriz al extremo del eje del alternador.

3. Para la puesta en marcha del alternador se debe regular la velocidad de la máquina motriz para obtener la frecuencia deseada y regular la intensidad de excitación para obtener la tensión.

El aumento de velocidad produce el aumento de frecuencia y tensión, mientras que el aumento de excitación produce el aumento de tensión y disminución de la frecuencia; por esta razón se hace necesario regular las dos simultáneamente.

4. Cuando la intensidad de la corriente generada o corriente de carga aumenta, la tensión y la frecuencia disminuye, obteniendo en el alternador una potencia creciente.

5. Tres bobinados colocados a  $120^\circ$  son la fuente de tres corrientes alternas desfasadas en  $120^\circ$ . Estas tres corrientes iguales estarán desfasadas en  $1/3$  de ciclo la una con relación a la otra y así se obtiene un sistema trifásico que se puede conectar en triángulo o en estrella.

6. En la conexión en estrella un borne de cada uno de los bobinados del estator desfasados  $120^{\circ}$  se conecta a un punto común llamado punto neutro.

Cuatro hilos salen del alternador, el conductor neutro conectado al punto neutro y los tres conductores de fase conectados a los otros bornes de los bobinados estatóricos. Esta conexión permite obtener tres tensiones entre fases y tres tensiones entre fases y neutro.

Tensión entre fases =  $3 \times$  Tensión entre fase y neutro

7. En la conexión en triángulo se conectan las tres bobinas en serie y saliendo del alternador con tres conductores conectados a los bornes de cada bobinado en el estator.

En esta conexión se obtienen tres tensiones que son las tensiones entre bornes de cada una de las bobinas, debido a que se suprime el conductor neutro.

El alternador de este proyecto, construido con las características teóricas calculadas en los capítulos 6, 7, 8 y 9, fué probado en su funcionamiento después de haber recibido la colaboración de la Corporación Universitaria Autónoma de Occidente, facilitándonos los la

boratorios e instrumentos de medida.

En términos generales los cálculos realizados están muy ajustados a la realidad de la máquina, por lo que estamos satisfechos de la labor realizada, ya que tuvimos muchos inconvenientes para llegar a su culminación.

Esperamos que esta obra sirva para despertar en los estudiantes que actualmente cursan su carrera de Ingeniería Eléctrica, el interés por el diseño de máquinas, ya que en nuestro medio hay una gran escasez de personal capacitado en este tipo de trabajo.

Acompañando estos textos dejamos en la Universidad el alternador didáctico calculado junto con su respectiva máquina motriz y su excitatriz.

## GLOSARIO

**AUTOEXCITACION:** Excitación que proviene de la misma energía eléctrica producida por la máquina.

**CORRIENTE DE FASE:** Corriente que circula por cada fase.

**CORRIENTE DE LINEA:** Corriente que circula por cualquier línea diferente del neutro.

**ESTATOR:** Partes de la máquina sin movimiento.

**EXCITACION INDEPENDIENTE:** Excitación que proviene de una fuente exterior a la máquina.

**EXCITACION PROPIA:** Excitación que proviene de un sistema accionado por el mismo eje de la máquina.

**EXCITATRIZ:** Generador que suministra la corriente para la excitación de una máquina.

**FACTOR DE POTENCIA:** Relación entre potencia activa y aparente. En sistema de tensión y corriente prácticamente senosoidales, éste factor se determina coseno  $\theta$ .

**FUNCIONAMIENTO A CARGA NOMINAL:** Cuando la potencia de salida tiene el valor nominal.

**FUNCIONAMIENTO EN VACIO:** Estado de funcionamiento de una máquina girando a su velocidad normal en régimen nominal sin que se le exija suministrar potencia.

**GENERADORES:** Máquina que transforma energía mecánica en energía eléctrica.

**GENERADORES DE CORRIENTE CONTINUA:** Generador que transforma energía mecánica en energía eléctrica de corriente continua.

- GENERADOR AUTOEXCITADO DERIVACION ( SHUNT ):** Generador en el cual el devanado de excitación está conectado en paralelo con el inducido.
- GENERADOR AUTOEXCITADO SERIE:** Generador en el cual el devanado de excitación está conectado en serie con el inducido.
- GENERADOR AUTOEXCITADO DERIVACION: Serie ( Compound ):** Generador en el cual existen dos devanados de excitación, uno conectado en serie y otro en paralelo con el inducido.
- GENERADOR DE CORRIENTE ALTERNA:** Generador que transforma energía mecánica en energía eléctrica de corriente alterna.
- GRUPO DE EXCITACION:** Sistema que suministra energía eléctrica, utilizada para la excitación de máquinas eléctricas.
- GRUPO GENERADOR:** Grupo de generadores de energía eléctrica accionados por un motor primario.
- GENERADOR DE POLOS SALIENTES:** Generador de más de 4 polos o con una potencia usualmente menor de 5 MVA.
- GENERADOR SINCRONICO ( ALTERNADOR ):** Generador que transforma energía mecánica en energía eléctrica de corriente alterna cuya frecuencia es proporcional al número de revoluciones de la máquina.
- GENERADOR SINCRONICO DE ROTOR BOBINADO:** Generador sincrónico en el cual el inducido está en el rotor y el inductor en el estator.
- INDUCIDO:** Parte de la máquina encargada de transformar la energía eléctrica en mecánica en los motores y la energía mecánica en eléctrica en los generadores.
- INDUCTOR:** Parte de la máquina encargada de producir el campo magnético.
- MAQUINAS MONOFASICAS O POLIFASICAS ( En particular trifásicas ):** Máquina que genera o utiliza corriente monofásica o polifásica ( en particular trifásica ).
- MAQUINA ASINCRONICA:** Máquina en la cual el rotor gira a diferentes revoluciones que el campo magnético.

**MOTOR PRIMARIO DE UN GENERADOR ELECTRICO:** Máquina que acciona un generador.

**MAQUINA DE REFRIGERACION NATURAL:** Máquina que se refrigera produciendo el movimiento del aire únicamente por la rotación de sus partes o por diferencia de temperatura.

**MAQUINA SINCRONICA:** Máquina en la cual el rotor gira a las mismas revoluciones que el campo magnético.

**MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA:** Motor que transforma energía eléctrica de corriente continua en energía magnética.

**MOTOR ASINCRONICO ( DE INDUCCION ):** Motor que transforma energía eléctrica de corriente alterna en energía mecánica y cuyas revoluciones no son proporcionales a la frecuencia de la tensión aplicada.

**MOTOR AUTOEXCITADO DERIVACION ( SHUNT ):** Motor en el cual el devanado de excitación está conectado en paralelo con el inducido.

**MOTOR AUTOEXCITADO SERIE:** Motor en el cual el devanado de excitación está conectado en serie con el inducido.

**MOTOR AUTOEXCITADO DERIVACION SERIE ( COMPOUND ):** Motor en el cual existen dos devanados de excitación, uno conectado en serie y otro en paralelo con el inducido.

**MOTOR DE CORRIENTE ALTERNA:** Motor que transforma energía eléctrica de corriente alterna en energía mecánica.

**MOTOR DE ANILLOS:** Motor asincrónico con el devanado secundario unido a anillos rozantes.

**MOTOR DE EXCITACION INDEPENDIENTE:** Motor cuya excitación proviene de una fuente exterior a la máquina.

**MOTOR DE JAULA:** Motor cuyo rotor está formado por anillos unidos a barras conductoras.

**MOTOR DE ROTOR BOBINADO:** Motor asincrónico cuyo rotor está formado por un devanado.

**MOTOR SINCRONICO:** Motor que transforma energía eléctrica de corriente alterna de energía mecánica y cuyas revoluciones son



proporcionales a la frecuencia de la tensión aplicada.

**MOTOR UNIVERSAL:** Motor construido para funcionar con corriente continua y alterna.

**POTENCIA ACTIVA ( EFECTIVA ):** Es el producto de la tensión eficaz por la componente de la corriente eficaz que se encuentra en fase con la tensión, multiplicada por un factor cuyo valor depende del número de fases del sistema.

**POTENCIA APARENTE:** Es el producto de la tensión eficaz por la corriente eficaz, multiplicada por un factor cuyo valor depende del número de fases del sistema.

**POTENCIA DE ENTRADA:** Potencia absorbida por una máquina.

**POTENCIA REACTIVA:** Es el producto de la tensión eficaz por la componente de la corriente eficaz que se encuentra en cuadratura con la tensión, multiplicada por un factor cuyo valor depende del número de fases del sistema.

**POTENCIA DE SALIDA:** Potencia suministrada por una máquina.

**REGIMEN:** Conjunto de los valores numéricos de las características eléctricas y mecánicas que determinan, en una máquina rotativa, las exigencias impuestas por un circuito eléctrico o un dispositivo mecánico, en un instante dado.

**RENDIMIENTO:** Es la relación entre las potencias de salida y de entrada.

**ROTOR:** Partes de la máquina con movimiento.

**REPOSO:** Ausencia completa de todo movimiento y de toda alimentación eléctrica o de accionamiento mecánico.

**SERVICIO:** Estipulación de los regímenes, incluyendo los períodos de funcionamiento en vacío y reposo a los que está sometida la máquina, así como su duración y secuencia en tiempo.

**SERVICIO CONTINUO ( SERV. CONT. ):** Funcionamiento en régimen constante con una duración suficiente para que se establezca el equilibrio térmico.

**SERVICIO INTERMITENTE PERIODICO CON ARRANQUE S 4:** Servicio formado por una sucesión de ciclos idénticos, comprendiendo

cada uno un período de tiempo apreciable de arranque, otro funcionamiento a régimen constante y otro de reposo.

**SERVICIO NOMINAL:** Conjunto de los valores numéricos de las características eléctricas y mecánicas, relacionadas con su duración y secuencia en tiempo, asignadas a la máquina por el fabricante, e indicadas en la placa de características, estando la máquina de acuerdo con las condiciones especificadas.

**SERVICIO TEMPORAL S 2:** Funcionamiento en régimen constante durante un período de tiempo determinado, menor que el requerido para alcanzar el equilibrio térmico, seguido de un reposo de una duración suficiente para que la temperatura ascienda hasta igualarse a la del medio refrigerante en  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

**TENSION DE FASE:** Diferencia de potencial entre los extremos de un devanado de fase.

**TENSION DE LINEA:** Tensión entre conductores diferentes del neutro.

**TENSION AL NEUTRO ( TENSION ESTRELLA ):** Tensión entre un conductor de línea y el neutro.

**TENSION DE UNA MAQUINA:** Diferencia de potencial entre los bornes de la máquina.

**TIPO DE SERVICIO:** Servicio que comprende uno o más regímenes constantes durante los tiempos especificados.

**TURBOGENERADOR:** Generador de 2 ó 4 polos cilíndricos de potencia usualmente mayor de 5 MVA, cuyo motor primario es una turbina de alta velocidad.

**VALORES NOMINALES:** Magnitudes eléctricas y mecánicas asignadas a la máquina por el fabricante y que deberán ser indicadas en la placa con el fin de determinar su funcionamiento bajo determinadas condiciones.

## BIBLIOGRAFIA

- ESTADOS UNIDOS. AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI). General Requirements for Synchronous Machines. Norma ANSI C50-10-1977. Published by: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Approved: August 4/75.
- APONTE, Adolfo Leon y PALACIOS, Jairo Arcesio. Diseño electromagnético de un generador eléctrico de 255 Kw. Tesis. I.E. Cali, Universidad del Valle; 1982.
- CASADO VALERO, Ricardo. Máquinas eléctricas. Tecnología 2 - 1. 1a. Ed. Bruño Marqués de Mondéjar, 32. Madrid 28. España. 1978. 363p.
- CORRALES MARTIN, Juan. Cálculo industrial de máquinas eléctricas. Tomo I. DANA E. Barcelona, España. 1968. 590p.
- ....., ..... Tomo II. DANA E. Barcelona, España. 1967. 559p.
- DAWES, Chester L. Tratado de electricidad II. Corriente alterna. Gustavo Gili, S.A. Barcelona, España. 1971. 735p.
- GRAY, Alexander y WALLACE, G. A. Electrotecnia 4a. Ed. Aguilar. Madrid, España. 1979. 696p.
- ICONTEC. Norma 320. Definiciones de motores y generadores eléctricos.
- KOSOW, Irving L. Máquinas eléctricas y transformadores. 1a. Ed. Reverté S. A. Barcelona, España. 1980. 727p.
- KOSTENKO, M. P y PIOTROVSKI, L. M. Máquinas eléctricas. Tomo II. 1a. Ed. MIR. Moscú. URSS. 1976. 719p.

- KUHLMANN, John H. Diseño de aparatos eléctricos. 7a. ed. Compañía Editorial Continental S.A. CECSA. México. 1980. 559p.
- LIWSCHITZ GARIK, Michael. Máquinas de corriente alterna. 1a. Ed. Continental. México. 1974. 375p.
- THALER, George J. y WILCOX, Milton L. Máquinas eléctricas. 2a. Ed. Limusa. México. 1979. 675p.

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN ALTERNADOR DIDACTICO

TOMO II

GUIA DE LABORATORIOS

JOSE DORANCE CORREA RIOS

JAIME ALBERTO PINCAY GORDILLO

Trabajo de grado presentado como  
requisito parcial para optar al título  
de Ingeniero Electricista.

Director: DIDIER NAVARRO N., I.E.

Asesora: MARTHA CECILIA AMAYA, I.E.

CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DE OCCIDENTE

DIVISION DE INGENIERIAS

PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRICA



C.U.A.O.  
BIBLIOTECA



\*0017982\*

CALI, 1987

Universidad Autónoma de Occidente  
Sección Biblioteca

9773

T  
621.3133  
C824d  
V.2  
e.1

Aprobado por el Comité de Trabajo de  
Grado en cumplimiento de los requisitos  
exigidos por la Corporación Universita -  
ria Autónoma de Occidente para optar al  
título de Ingeniero Electricista.



DIDIER NAVARRO N., I.E.  
Director



MARTHA CECILIA AMAYA, I.E.  
Asesora



FREYDER POSSO, I.E.  
Jurado

Cali, Noviembre de 1987

## TABLA DE CONTENIDO

### TOMO II

	Pág.
INTRODUCCION .....	1
1 DISPOSICION DEL EQUIPO .....	3
1.1 BANCO DE TRABAJO .....	3
1.2 MONTAJE DE LA UNIDAD MATRIZ .....	4
1.3 DISPOSICION DEL ALTERNADOR .....	5
1.3.1 Eje .....	5
1.3.2 Estator .....	7
1.3.3 Rotor del alternador didáctico .....	9
 PRACTICA No. 1 - ELEMENTOS BASICOS DE UN ALTERNADOR	
1 OBJETIVOS .....	11
2 CONCEPTOS BASICOS .....	11
2.1 EJE .....	12

2.2 ALTERNADOR .....	12
2.2.1 Estator .....	13
2.2.2 Rotor .....	14
2.2.3 Arrollamientos .....	14
2.2.4 Bobinas de excitación .....	15
2.2.5 Anillos rozantes .....	15
2.2.6 Ventilación .....	15
2.2.7 Cojinetes .....	16
2.3 EXCITATRIZ .....	16
3 EQUIPO UTILIZADO .....	17
4 PROCEDIMIENTO .....	17
5 INFORME .....	19
6 BIBLIOGRAFIA .....	19
PRACTICA No.2 - PRINCIPIOS BASICOS DE ELECTRO	
MAGNETISMO, PRINCIPIO GENERADOR	
1 OBJETIVOS .....	20
2 CONCEPTOS BASICOS .....	20
3 EQUIPO UTILIZADO .....	26



4	PROCEDIMIENTO .....	26
5	INFORME .....	28
6	BIBLIOGRAFIA .....	30

### PRACTICA No.3 - PUESTA EN MARCHA DEL ALTER NADOR DIDACTICO

1	OBJETIVOS .....	31
2	CONCEPTOS BASICOS .....	31
3	EQUIPO UTILIZADO .....	34
4	PROCEDIMIENTO .....	35
4.1	PUESTA EN MARCHA CON EXCITACION INDE PENDIENTE .....	35
4.2	PUESTA EN MARCHA DEL ALTERNADOR AUTOEXCITADO .....	37
5	INFORME .....	37
6	BIBLIOGRAFIA .....	38

### PRACTICA No.4 - EFECTOS DE LA VARIACION DE VELOCIDAD SOBRE LA FRECUENCIA DE GENERACION

1	OBJETIVOS .....	39
2	CONCEPTOS BASICOS .....	40
3	EQUIPO UTILIZADO .....	42
4	PROCEDIMIENTO .....	44
5	INFORME .....	44
6	BIBLIOGRAFIA .....	46

#### PRACTICA No.5 - EFECTOS DE LA FRECUENCIA VARIANDO EL NUMERO DE POLOS

1	OBJETIVO .....	47
2	CONCEPTOS BASICOS .....	47
3	EQUIPO UTILIZADO .....	49
4	PROCEDIMIENTO .....	50
5	INFORME .....	50
6	BIBLIOGRAFIA .....	52

#### PRACTICA No.6 - EFECTOS DE LA VARIACION DE CARGA EN LA TENSION GENERADA

1	OBJETIVOS .....	53
2	CONCEPTOS BASICOS .....	53
3	EQUIPO UTILIZADO .....	54
4	PROCEDIMIENTO .....	54
5	INFORME .....	57
6	BIBLIOGRAFIA .....	57

#### PRACTICA No. 7 - GENERADORES TRIFASICOS

1	OBJETIVOS .....	58
2	CONCEPTOS BASICOS .....	58
2.1	ALTERNADOR BIFASICO .....	59
2.2	ALTERNADOR TRIFASICO .....	61
3	EQUIPO UTILIZADO .....	62
4	PROCEDIMIENTO .....	63
5	INFORME .....	67
6	BIBLIOGRAFIA .....	67

PRACTICA N<sup>o</sup>.8 - CONEXION TRIFASICA EN ESTRELLA  
O Y DEL ALTERNADOR DIDACTICO

1	OBJETIVOS .....	68
2	CONCEPTOS BASICOS .....	68
2.1	CONEXION EN ESTRELLA .....	69
2.2	TENSIONES, INTENSIDADES Y POTENCIA DE UN ALTERNADOR CONECTADO EN ESTRELLA .	71
3	EQUIPO UTILIZADO .....	74
4	PROCEDIMIENTO .....	74
5	INFORME .....	76
6	BIBLIOGRAFIA .....	76

PRACTICA N<sup>o</sup>.9 - CONEXION TRIFASICA EN TRIANGU  
LO O DELTA DEL ALTERNADOR DIDACTICO

1	OBJETIVOS .....	78
2	CONCEPTOS BASICOS .....	78
2.1	CONEXION EN TRIANGULO .....	79

2.2	TENSIONES, INTENSIDAD Y POTENCIA DE UN ALTERNADOR CONECTADO EN TRIANGULO .	79
3	EQUIPO UTILIZADO .....	83
4	PROCEDIMIENTO .....	83
5	INFORME .....	83
6	BIBLIOGRAFIA .....	85
PRACTICA No. 10 - ENSAYO EN VACIO Y EN CORTO DEL ALTERNADOR DIDACTICO		
1	OBJETIVOS .....	86
2	CONCEPTOS BASICOS .....	86
2.1	ENSAYO EN VACIO .....	86
2.2	ENSAYO EN CORTO .....	88
2.3	REACTANCIAS EN EL ALTERNADOR .....	89
2.3.1	Reactancia de dispersión ( $X_d$ ) .....	90
2.3.2	Reactancia de reacción de inducido ( $X_a$ ) ...	90
2.3.3	Reactancia de sincronismo ( $X_s$ ) .....	90
2.4	CALCULO DE LA REGULACION .....	90

3	EQUIPO UTILIZADO .....	92
4	PROCEDIMIENTO .....	92
5	INFORME .....	93
6	BIBLIOGRAFIA .....	94

## LISTA DE FIGURAS

### TOMO II

		Pág.
FIGURA 1	Montaje de la unidad motriz .....	4
FIGURA 2	Disposición del equipo .....	5
FIGURA 3	Disposición del eje .....	6
FIGURA 4	Disposición general del alternador didáctico .....	8
FIGURA 5	Polos del rotor del alternador didáctico	9
FIGURA 6	Disposición completa del rotor del alternador didáctico .....	10
FIGURA 7	Esquema de partes y conexiones .....	18
FIGURA 8	Campo magnético producido por: a) solenoide; b) electroimán .....	22
FIGURA 9	Regla de mano derecha de Fleming ..	25
FIGURA 10	Fuerza electromotriz inducida en una espira que gira a velocidad constante en un campo magnético uniforme .....	25
FIGURA 11	Esquema de conexiones 2 bobinas inductoras, 2 bobinas inducidas .....	27
FIGURA 12	Conexión de los dos nuevos bobinados del inducido. * Agrupados en serie como los dos primeros. * Introducir el segundo grupo en paralelo con el primero invirtiendo el uno con relación al otro ....	29

FIGURA 13	Alternador de inducido giratorio e inductor fijo .....	32
FIGURA 14	Alternador de campo inductor giratorio e inducido fijo .....	32
FIGURA 15	Aspecto de un grupo alternador (pequeña potencia) .....	34
FIGURA 16	Puesta en marcha con excitación independiente .....	36
FIGURA 17	Inductor dando una vuelta .....	42
FIGURA 18	Frecuencia según la velocidad .....	43
FIGURA 19	Variación de la frecuencia al cambio de velocidad .....	45
FIGURA 20	Máquina de cuatro polos de conexión de los cuatro bobinados inductores en serie	51
FIGURA 21	Efectos de la variación de carga .....	55
FIGURA 22	Alternador dipolar bifásico .....	60
FIGURA 23	Esquema simplificado de un alternador trifásico .....	62
FIGURA 24	Fem inducida en una bobina del estator	64
FIGURA 25	Un segundo bobinado a $120^\circ$ del primero será el origen de una segunda corriente alterna .....	65
FIGURA 26	Un tercer bobinado será el origen de una tercera corriente desfasada $1/3$ de ciclo con relación a la segunda y $2/3$ con relación a la primera .....	66
FIGURA 27	Representación esquemática de un generador trifásico .....	69
FIGURA 28	Sistema de cuatro hilos conectado en Y	70
FIGURA 29	Tensiones en un alternador trifásico conectado en Y .....	72



FIGURA 30	Conexión en estrella .....	75
FIGURA 31	Alternador conectado en triángulo .....	79
FIGURA 32	Diagrama vectorial de la conexión en triángulo .....	81
FIGURA 33	Conexión en triángulo .....	84
FIGURA 34	Diagrama de conexiones ensayo en vacío	87
FIGURA 35	Características de vacío y corto .....	87
FIGURA 36	Diagrama de conexiones ensayo en corto	88
FIGURA 37	Diagrama fasorial .....	91

## INTRODUCCION

En esta segunda parte se dá la información necesaria y exacta de la forma como debe ser manipulado el equipo didáctico.

Nuestro deseo es ante todo velar por el buen uso de la máquina, para así extender por mayor tiempo su vida útil ya que un mal montaje de las piezas puede ocasionar graves deterioros en el equipo, además de velar por la seguridad de las personas que la manipulan.

Es de primordial importancia, por tanto, que el instructor encargado de dictar las prácticas con el equipo didáctico lea cuidadosamente los capítulos 4 y 5 que explican las diferentes piezas de que consta el equipo, la forma de acople y montaje de cada una de las posibles prácticas, sus características, etc.

Nota: La mejor indicación de que el montaje se está realizando correctamente, es trabajar sin tener que recurrir a golpes, palan

cas que pongan en peligro la conservación del equipo, verificar la ausencia de rozamientos entre el rotor y el estator, de calentamiento en los rodillos y de ruidos extraños en el motor de corriente con tínua, máquina motriz y generador de corriente continúa o máquina excitatriz.

## 1. DISPOSICION DEL EQUIPO

### 1.1 BANCO DE TRABAJO

La elección del banco de trabajo adecuado es indispensable para el buen funcionamiento del equipo, ya que las vibraciones ocasionadas por una mala fijación interfieren grandemente en las diversas medidas que se toman e impiden que el equipo desarrolle su velocidad, potencia y corriente nominales.

El banco de trabajo está fabricado en madera, su superficie debe ser completamente horizontal, debe estar sólidamente fijo al piso, su altura debe ser la adecuada para el fácil manejo de reóstatos, conexiones y equipo de mediciones, aproximadamente debe tener un metro de altura.

Las dimensiones de la superficie de trabajo son: 1,20 m por 0,50 m. Se requiere que su peso sea relativamente grande en comparación con el del equipo para simular una plataforma sólida y estable.

## 1.2 MONTAJE DE LA UNIDAD MATRIZ

La base general del equipo está construida de modo que es posible montar el motor de corriente continua marca ICO, en el lado izquierdo de la corona polar. Existen allí unas guías alargadas hasta el acople con el alternador didáctico. Esto es importante para acoplar adecuadamente el motor al eje del alternador.

Recomendamos no poner en rotación el equipo sin asegurar una perfecta alineación de sus ejes para evitar recalentamiento en los rodillos y peligrosas fuerzas flexoras en los ejes. Las Figuras 1 y 2 muestran esquemáticamente la disposición del montaje del equipo.

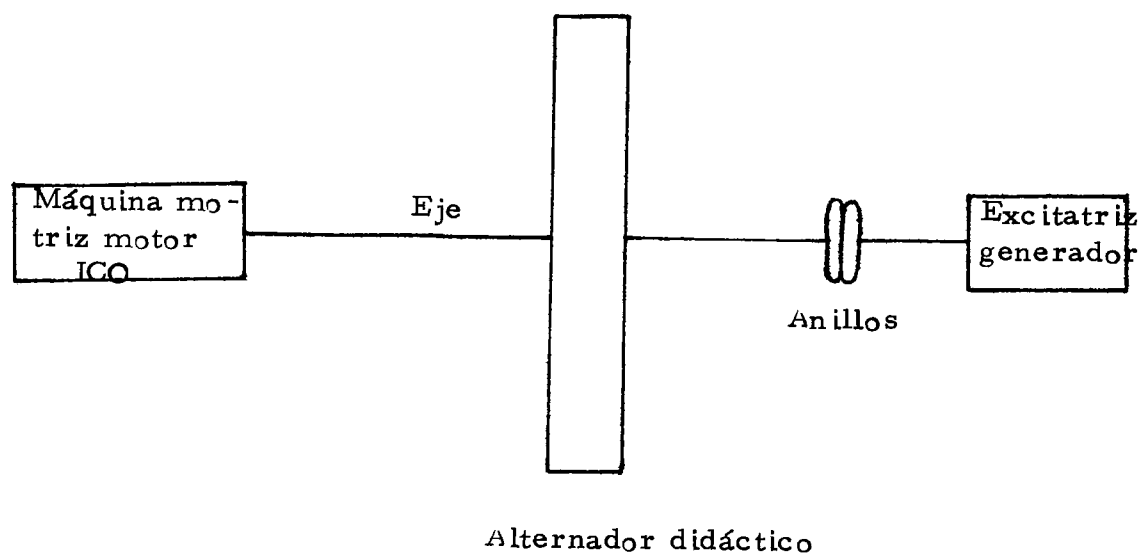


FIGURA 1. Montaje de la unidad motriz

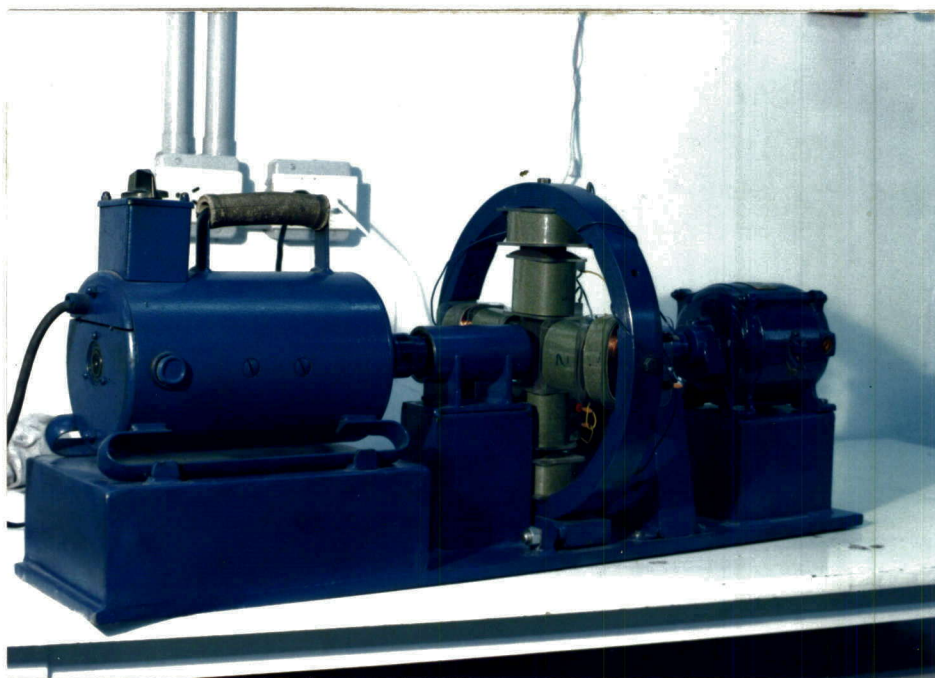


FIGURA 2. Disposición del equipo

### 1.3 DISPOSICION DEL ALTERNADOR

#### 1.3.1 Eje

Aunque normalmente permanecerá adherido al de la base general, es oportuno advertir acerca de los cuidados con el mismo. Requiere especialmente prevenirle contra golpes que puedan torcer, lo cual impedirá que opere normalmente.

Es fácil identificar el extremo por el cual se acopla el motor de corriente continua y el correspondiente al rotor del alternador, pues

el primero conserva el medio de acople fijo. El segundo posee cerca de él la chumacera y al otro extremo otro acople el cual nos permite unir este eje al alternador, en los extremos correspondientes al alternador, el eje es roscado con el fin de darle el ajuste necesario al inductor de la máquina.

Después del inductor encontramos los anillos rozantes posteriormente una chumacera la cual puede ser retirada con esta parte del eje. Luego encontramos un acople fijo para la fijación con la máquina excitatriz.

La Figura 3 muestra la disposición del eje con cada parte del alternador didáctico.

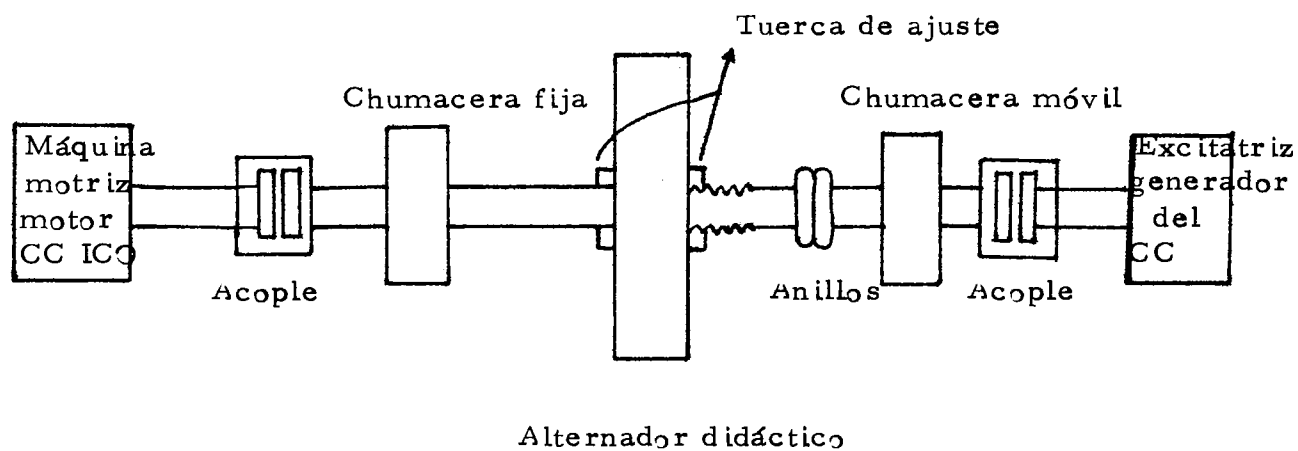


FIGURA 3. Disposición del eje

### 1.3.2 Estator

Recordemos que el árbol del alternador es el mismo eje que pasa por el par de rodamientos montados sobre el pedestal del equipo. En un tramo encontramos una ranura poco profunda que sirve para alojar una cuña. Por este mismo lado, sobre el pedestal, existe un acople señalando la ubicación precisa de la corona estatórica; más exactamente, la ubicación de la base de la corona. ( Véase Figura 4 )

Cuando el equipo se quiera emplear con velocidades de rotación por encima de 1000 R.P.M. será necesario acoplar todo el sistema para evitar la vibración.

Los núcleos polares del estator están numerados en correspondencia con números grabados en la corona, de 1 a 4.

Las bobinas de los polos se alojarán de modo que sus terminales de conexión miren hacia el interior del equipo y hacia la periferia de la corona. Los principios y fines de los arrollamientos en las bobinas se pueden identificar negros o rojos, según convenga, siempre manteniendo el orden definido.



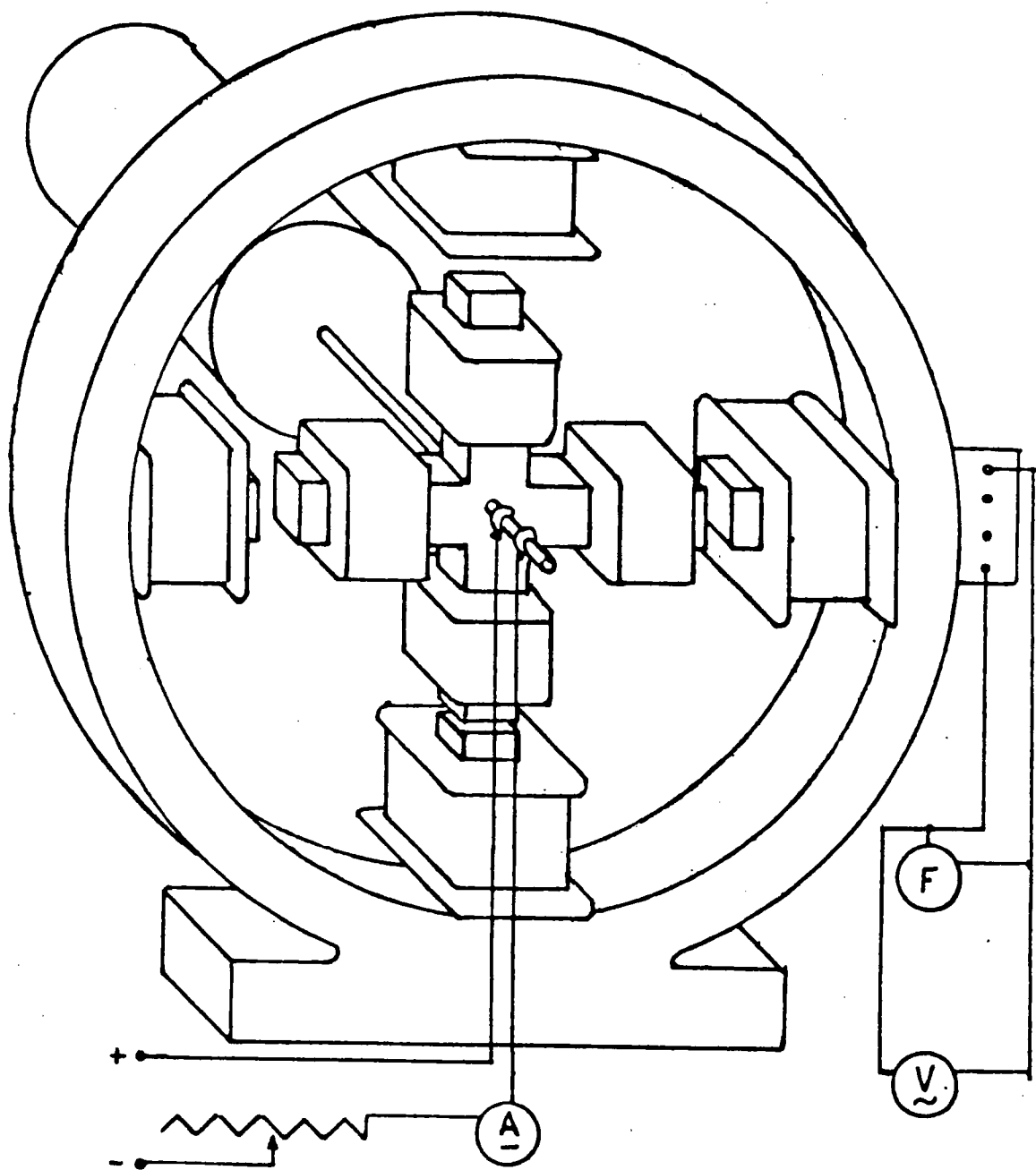


FIGURA 4. Disposición general del alternador didáctico.

### 1.3.3 Rotor del alternador didáctico

Este cuerpo tiene una parte enteriza reuniendo dos polos, la cama del eje y su cuña, y dispone de dos espacios o ranuras en forma de cola de milano para alojar y prensar a los dos polos restantes. Su orientación para el montaje está indicada por números del 1 al 4 grabados en una cara que debe mirar el exterior del equipo.



FIGURA 5. Polos del rotor del alternador didáctico

Para facilitar sus múltiples instalaciones, las bobinas se posicionan con los terminales de conexión orientados al exterior y poseen un conector rojo y otro negro distinguiendo principio y fin de bobina a gusto del usuario.

Para la fijación del rotor al eje se utilizará un cuñero y para evitar el movimiento axial del rotor se utilizará un sistema de tuercas a lado y lado del mismo. La Figura 6 muestra la disposición completa del rotor del alternador didáctico.

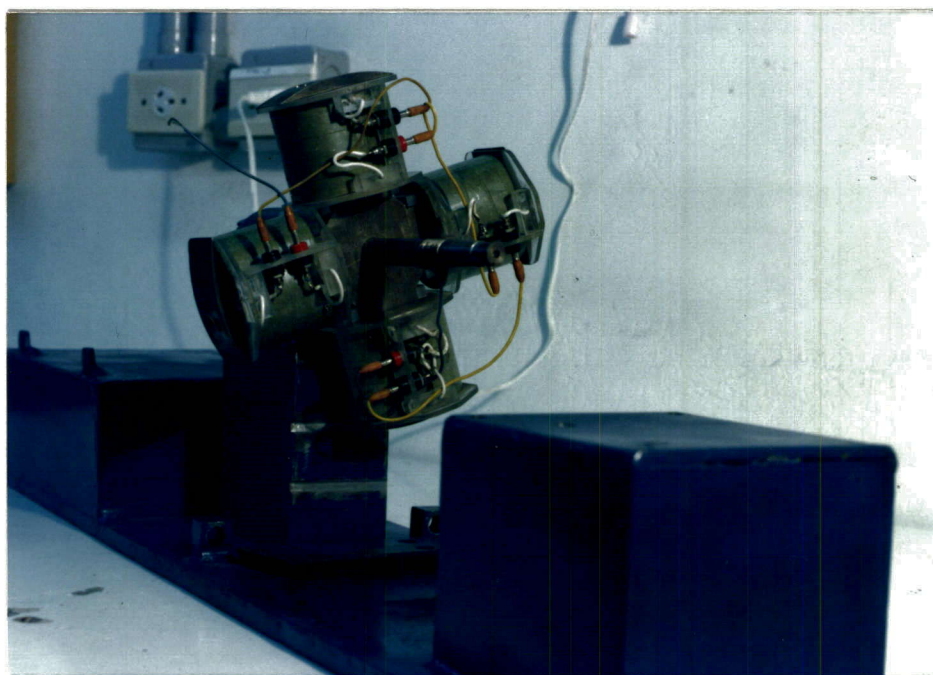


FIGURA 6. Disposición completa del rotor del alternador didáctico

CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DE OCCIDENTE

PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRICA

LABORATORIO DE CONVERSION DE ENERGIA

PRACTICA No. 1

## ELEMENTOS BASICOS DE UN ALTERNADOR

### 1. OBJETIVOS

- Identificar cada uno de los componentes o unidades básicas constitutivas de una máquina generadora de corriente alterna y su papel en el funcionamiento de la misma.
- Conocer las características de los componentes del alternador didáctico.

### 2. CONCEPTOS BASICOS

En general, las máquinas eléctricas sirven para transformar una

potencia mecánica en potencia eléctrica o viceversa. Para que una determinada energía mecánica se transforme en energía eléctrica, es condición esencial que exista un campo magnético que varíe o se mueva con respecto al órgano inducido de la máquina.

Las características de construcción del alternador didáctico se amplían en el Capítulo 9 del Tomo I. Las partes principales constitutivas de un alternador son:

## 2.1 EJE

Es propiamente el eje que une a la máquina generadora con el sistema motriz a través de un dispositivo llamado acople. Sobre este eje está normalmente montado el rotor del alternador y a su vez se suspende en los extremos por elementos que sólo permiten su rotación, llamados rodamientos o cojinetes.

## 2.2 ALTERNADOR

El alternador tiene sus propios componentes a saber:

### 2.2.1 Estator

Parte inmóvil de forma cilíndrica que en el caso de máquinas de elevada velocidad es largo en relación con su diámetro, mientras que para pequeñas velocidades es relativamente corto. Casi siempre hace el papel de inducido debido a los niveles de potencia que soporta su devanado, en vista de las facilidades que ofrece para alojar conductores de mayor calibre que en el rotor, disponer de más y mejores aislamientos, así como poder sacar al exterior la corriente generada, prescindiendo de anillos colectores u otros dispositivos.

Al igual que en la mayoría de las máquinas, la corona del estator está formada por láminas o chapas de hierro aisladas entre sí y agrupadas en paquetes fuertemente prensados y estos van sujetos por medio de discos o placas de presión fijadas por cuñas, o bien por pernos roscados que atraviesan los paquetes. Tales láminas vienen troqueladas dando forma a los polos salientes o a las ranuras en las cuales se alojarán posteriormente los conductores del devanado inducido. Rodeando los paquetes está la carcasa cuyo material es fundición de hierro liviana pero con la resistencia mecánica necesaria para servir de protector a la máquina. En resumen, el estator está compuesto principalmente por carcasa o culata, corona de chapas,

arrollamiento.

### 2.2.2 Rotor

Como lo indica su nombre, es el cuerpo móvil interior de las máquinas eléctricas rotativas y su forma varía de acuerdo al tipo y potencia de la máquina, variando con ello sus características de construcción. Está compuesto por una rueda polar que es la parte unida directamente al eje, su material es hierro fundido o de acero o de chapas; los núcleos hechos de acero fundido o de chapas; las zapatas polares que están localizadas en la parte superior de cada polo del mismo material, conforman el cuerpo magnético del rotor.

### 2.2.3 Arrollamientos

Son los conductores aislados que se introducen en las ranuras del estator por los lados, a menos que se puedan introducir por las aberturas. En la construcción de una máquina es ventajoso que las bobinas se construyan por separado en plantilla o formaleta que le dan la configuración deseada.

#### 2.2.4 Bobinas de excitación

Constituídas por conductores también aislados y arrollados de modo tal que los núcleos encajen perfectamente en ellas. Corrientemente se utilizan bridas reforzadas para soportar la fuerza centrífuga que empuja las bobinas hacia las piezas polares.

#### 2.2.5 Anillos rozantes

La entrada y salida de la corriente de excitación para el generador se efectúa mediante anillos rozantes de bronce, cobre o acero previamente aislados que van calados sobre el eje o bien sujetos a un cubo especial. Las escobillas suelen ser de carbón blando. Se inyecta la corriente de excitación desde alguna fuente exterior de D.C., por ejemplo una excitatriz acoplada al eje del rotor.

#### 2.2.6 Ventilación

En máquinas modernas, la ventilación se efectúa disponiendo un ventilador en el eje, frente al rotor, o por aletas fijas a la rueda polar. En otros casos, más sofisticados, se emplean conductos especiales en la carcasa y con ventiladores u otros sistemas de refrigeración se impulsa el aire fresco a través de esos conductos.



### 2.2.7 Cojinetes

En máquinas pequeñas se utilizan rodamientos de balineras o rodillos, pero en los grandes se emplean chumaceras fabricadas en babbit y su lubricación es por anillos unas veces, mientras que en otras el lubricante se hace pasar por un refrigerador. Este lubricante es un aceite cuya viscosidad está de acuerdo con la velocidad de rotación.

### 2.3 EXCITATRIZ

La tensión de excitación es ordinariamente de 120 a 250 voltios y en las grandes centrales se produce por medio de un generador individual con accionamiento directo con reductor de engranajes o por medio de un motor, o se alimenta desde barras destinadas exclusivamente a la excitación. Las barras se alimentan por medio de un grupo motor generador conectado a las barras principales de la central. En centrales menores, la excitatriz va montada sobre el árbol del alternador o se acciona por medio de una correa movida por dicho árbol.

### 3. EQUIPO UTILIZADO

- Alternador didáctico
- Dos ( 2 ) voltímetros DC
- Un ( 1 ) voltímetro AC
- Cables de conexión
- Dos ( 2 ) fuentes reguladas de alimentación DC

### 4. PROCEDIMIENTO

- Tomar cada una de las partes del alternador didáctico, identificarla, tomar datos característicos de cada componente.
- Montar y conectar el equipo como lo muestra la Figura 7. Cerciórese de la firmeza de las conexiones y del libre giro del rotor.
- Alimentar el rotor con una  $E_{ex} = 35 \text{ Vcc}$  y verificar la presencia de campo magnético en las zapatas polares.
- Obtener 120 V de c.c para alimentar la máquina motriz. Tenga en cuenta que el interruptor de dicha máquina debe estar abierto.
- Verifique conexiones y cierre el interruptor de la máquina motriz.

- Mida la tensión de salida.

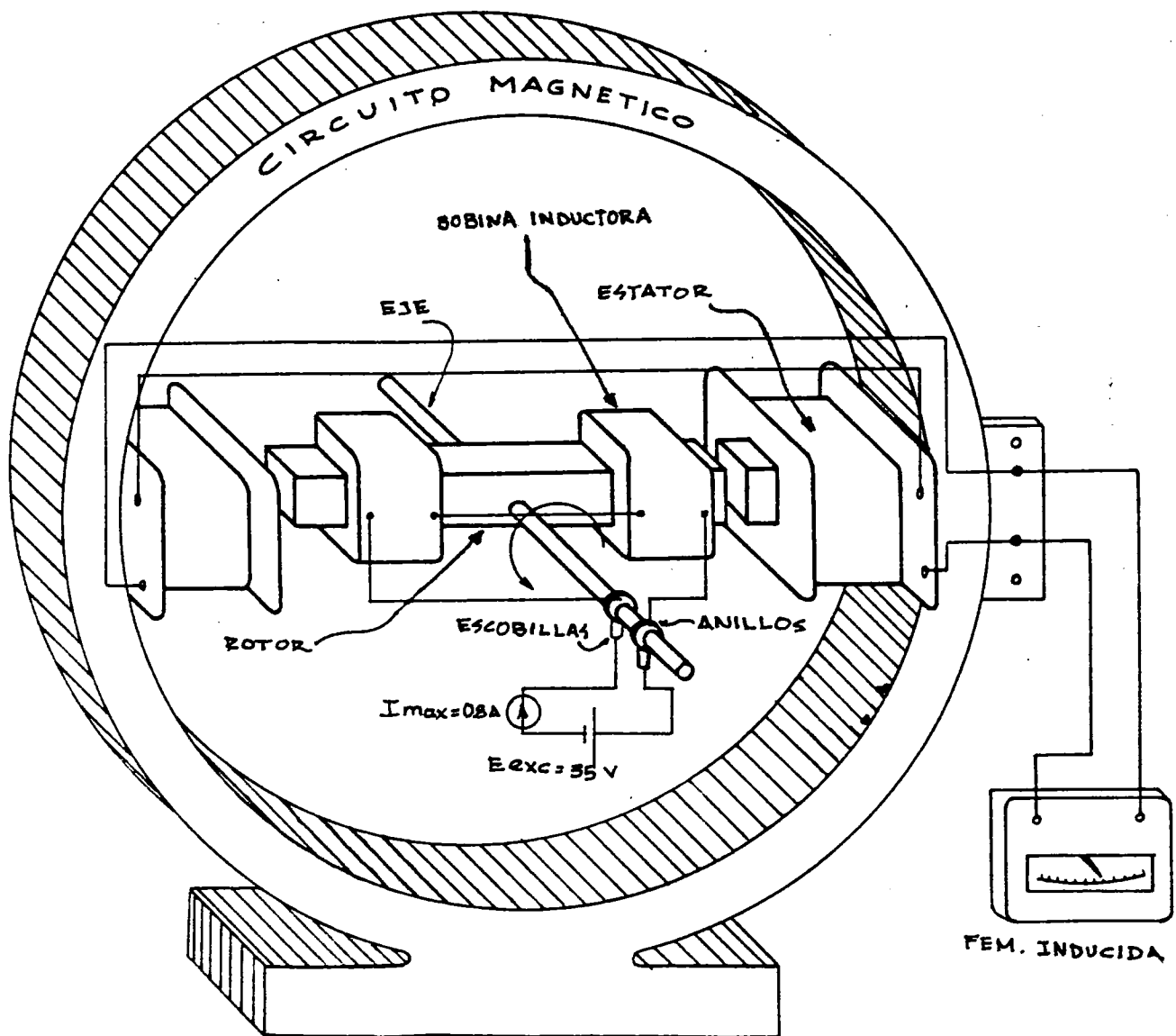


FIGURA 7. Esquema de partes y conexiones

## 5. INFORME

- Ampliar el tema respecto a fuentes de generación eléctrica, especialmente hidráulica.
- Hacer un diagrama simplificado del montaje hecho en la práctica.
- Enumerar las partes constitutivas del alternador utilizado y la función que desempeña.
- Hacer una analogía entre una central generadora de energía eléctrica y el montaje utilizado con el alternador didáctico.
- Indicar y elaborar gráficos de los diferentes devanados de los alternadores.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- DAWES, Chester L. Tratado de electricidad II. Corriente alterna.  
Editorial Gustavo Gili, S. A. Barcelona, España. 1971. p. 735
- KONYGSLÓW, A. La escuela del técnico electricista. Tomo V. 3a.  
Ed. Editorial Labor

CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DE OCCIDENTE

PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRICA

LABORATORIO DE CONVERSION DE ENERGIA

PRACTICA No. 2

PRINCIPIOS BASICOS DE ELECTROMAGNETISMO, PRINCIPIO  
GENERADOR

## 1. OBJETIVOS

Comprender y verificar los conceptos básicos del electromagnetismo, creación de campos magnéticos, efecto generador.

## 2. CONCEPTOS BASICOS

Un cuerpo puede imantarse bien colocándolo en la proximidad de un imán permanente o bien enviando una corriente a través de un enrollamiento efectuado alrededor del mismo.

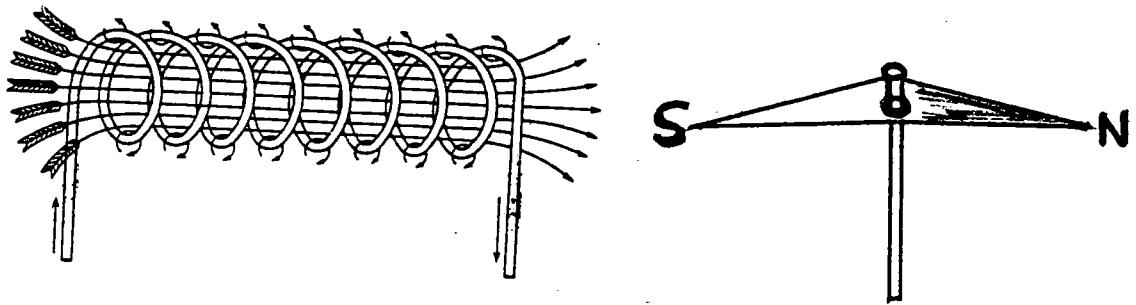
Un solenoide está constituido por un conductor arrollado sobre sí mismo de modo que forme un cierto número de espiras circulares regularmente dispuestas una a continuación de otras. La experiencia nos dice que cuando un solenoide es recorrido por una corriente, adquiere todas las propiedades del imán.

El polo norte del solenoide es repelido por el polo norte y atraído por el polo sur de un imán o de otro solenoide ( Ver Figura 8a)

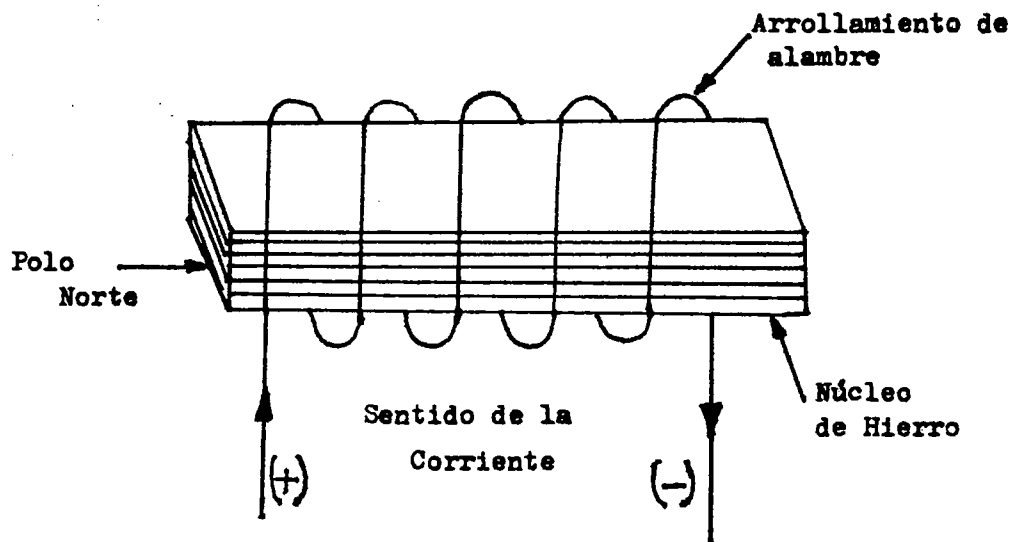
Cuando un conductor por el que circula corriente se arrolla sobre un núcleo de hierro se obtiene un electroimán. La acción electromagnética de la corriente produce un flujo magnético en el núcleo de hierro, del mismo modo que se genera en el aire por el interior de un solenoide. ( Ver Figura 8b )

En general el flujo magnético en una máquina se produce por medios eléctricos. Esto se consigue haciendo circular una corriente eléctrica por la bobina de un devanado colocado bien en la parte estática o bien en la parte dinámica de la máquina. Esta corriente se denomina "corriente magnetizante" y circula por el circuito magnetizado o centro magnético.

Cuando se incrementa la corriente que pasa por las bobinas aumen-



a) Solenoide



b) Electroimán

FIGURA 8. Campo magnético producido por: a) solenoide; b) electroimán

tará la fuerza magnética y como consecuencia aumentarán las líneas de fuerza.

Por tanto, es posible modificar la intensidad del campo magnético por medio de la intensidad de corriente que se haga pasar por las bobinas que lo forman.

#### EFECTO GENERADOR

Cuando el conductor se mueve utilizando un medio externo en contra de la fuerza antes dicha, es necesario realizar un trabajo para vencer esta fuerza y se genera una "fem" en el conductor.

El valor de esta fem es proporcional a la intensidad del campo y a la velocidad a la cual se desplaza el conductor. Por lo tanto, si el conductor se mueve lentamente, la fem será pequeña y si se mueve con rapidéz, la fem será mayor.

$$\begin{aligned} \text{Fem ( volt )} &= \frac{\text{Líneas de fuerza cortada por segundos}}{10^8} \\ &= \frac{B \times l \times v}{10^8} (1) \end{aligned}$$

---

( 1 ) CASADO, Ricardo. Tecnología eléctrica 1 - 2. Editorial Bruño, p. 164



donde:

$B$  = densidad del flujo en líneas/cm<sup>2</sup>

$l$  = longitud del circuito en cms

$v$  = velocidad del conductor cm/seg

Si tenemos muchos conductores que se muevan en un campo uniforme que están en ángulo recto con ellos, la f.e.m. generada por cada uno de ellos se suma dando lugar a la f.e.m. total de un generador.

Si se unen los terminales del conductor, circulará una corriente cuya dirección vendrá dada por la regla de la mano derecha. Para aplicar esta regla, los dedos pulgar e índice y corazón de la mano derecha se colocarán formando tres ángulos rectos, en forma semejante a la posición que adopta cuando se aplica la regla de la mano izquierda.

El pulgar indicará la dirección del movimiento del conductor y el índice la del campo; el dedo del corazón señala la dirección de la corriente.

Una f.e.m. se induce en un conductor independiente del campo magnético al cual está sometido. Los cambios se realizan independientes, ya se deban al movimiento del conductor o al movi-

miento del campo magnético, o a una variación de la intensidad del campo magnético originada por cambios de la corriente que lo produce. La Figura 9 muestra la regla de la mano derecha y la Figura 10 nos muestra cómo se produce una fem.

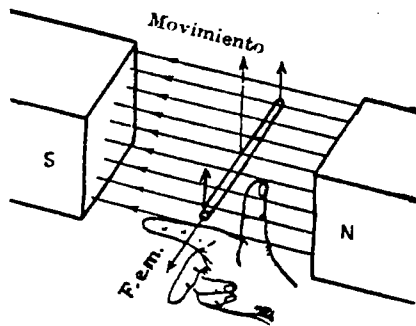


FIGURA 9. Regla de la mano derecha de Fleming

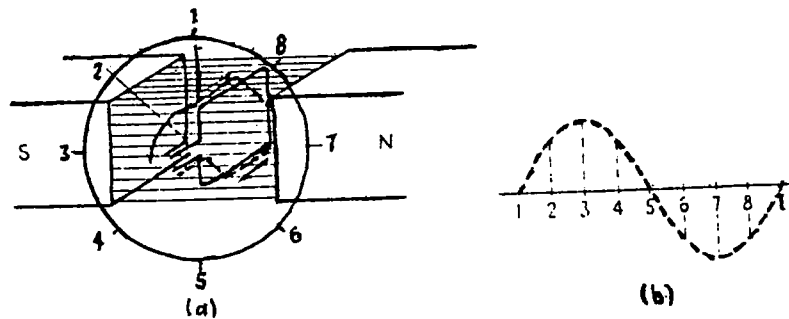


FIGURA 10. Fuerza electromotriz inducida en una espira que gira a velocidad constante en un campo magnético uniforme.

### 3. EQUIPO UTILIZADO

- Alternador didáctico
- Voltímetro A.C.
- Amperímetro D.C. ( 0 - 1A )
- Dos ( 2 ) fuentes reguladoras 0 - 150 Voc
- Tacómetro
- Cables de conexión

### 4. PROCEDIMIENTO

- Monte y conecte el equipo como lo muestra la Figura 11; verifique con la mano el giro libre del sistema.
- Alimente el rotor con 35 VDC y verifique la existencia del campo magnético en las zapatas polares. Debe tener en cuenta que la  $I_{max}$  de excitación no debe sobrepasarse de 0.8A.
- Ajuste la fuente de alimentación para la máquina motriz, en 70 VDC.
- Conecte la máquina motriz a la fuente de alimentación variable. Cierre el interruptor de control de la máquina motriz. Observe su

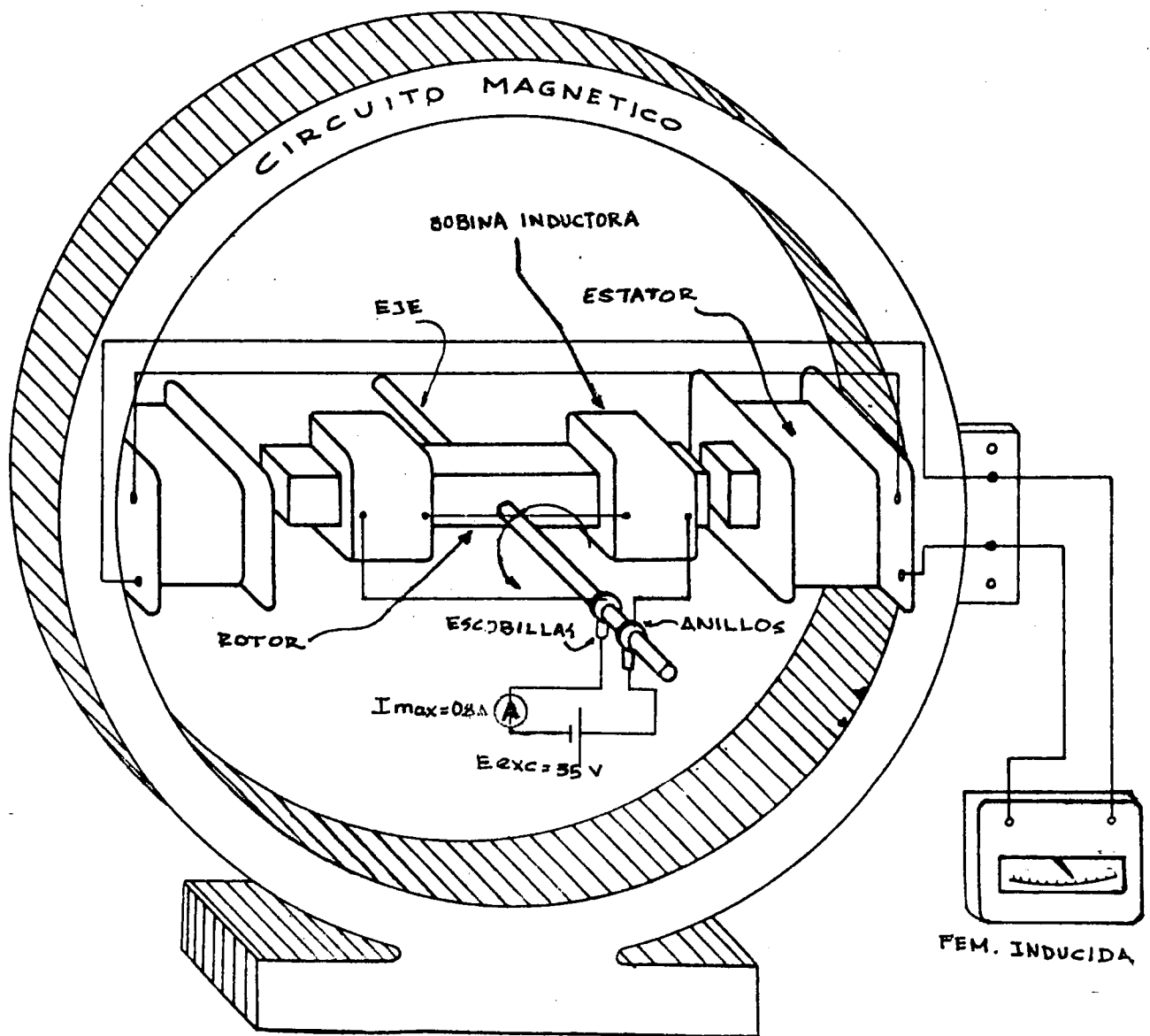


FIGURA 11. Esquema de conexiones 2 bobinas inductoras, 2 bobinas inducidas

funcionamiento si es normal. Tome datos de la fem inducida.

- Incremente el valor del voltaje de alimentación a la máquina motriz de 80 V, 90 V, 100 V y 110 V para cada caso, anote el valor de la fem inducida y elabore una tabla de datos y concluya al respecto.

- Modifique la velocidad del equipo la cual debe permanecer constante cuando se varíe la excitación.

- Aumente el valor del voltaje de excitación hasta alcanzar una excitación de: 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 A midiendo en cada caso la fem inducida ( la velocidad debe permanecer constante para cada caso )  
Elabore tabla de datos y concluya al respecto.

- Varíe el número de espiras del estator aumentando el número de bobinas del mismo de 2 a 4 como lo indica la Figura 12.

- Repita el procedimiento del segundo al séptimo pasos.

## 5. INFORME

- Qué factores determinan la magnitud de una fuerza electromotriz inducida? Explique.

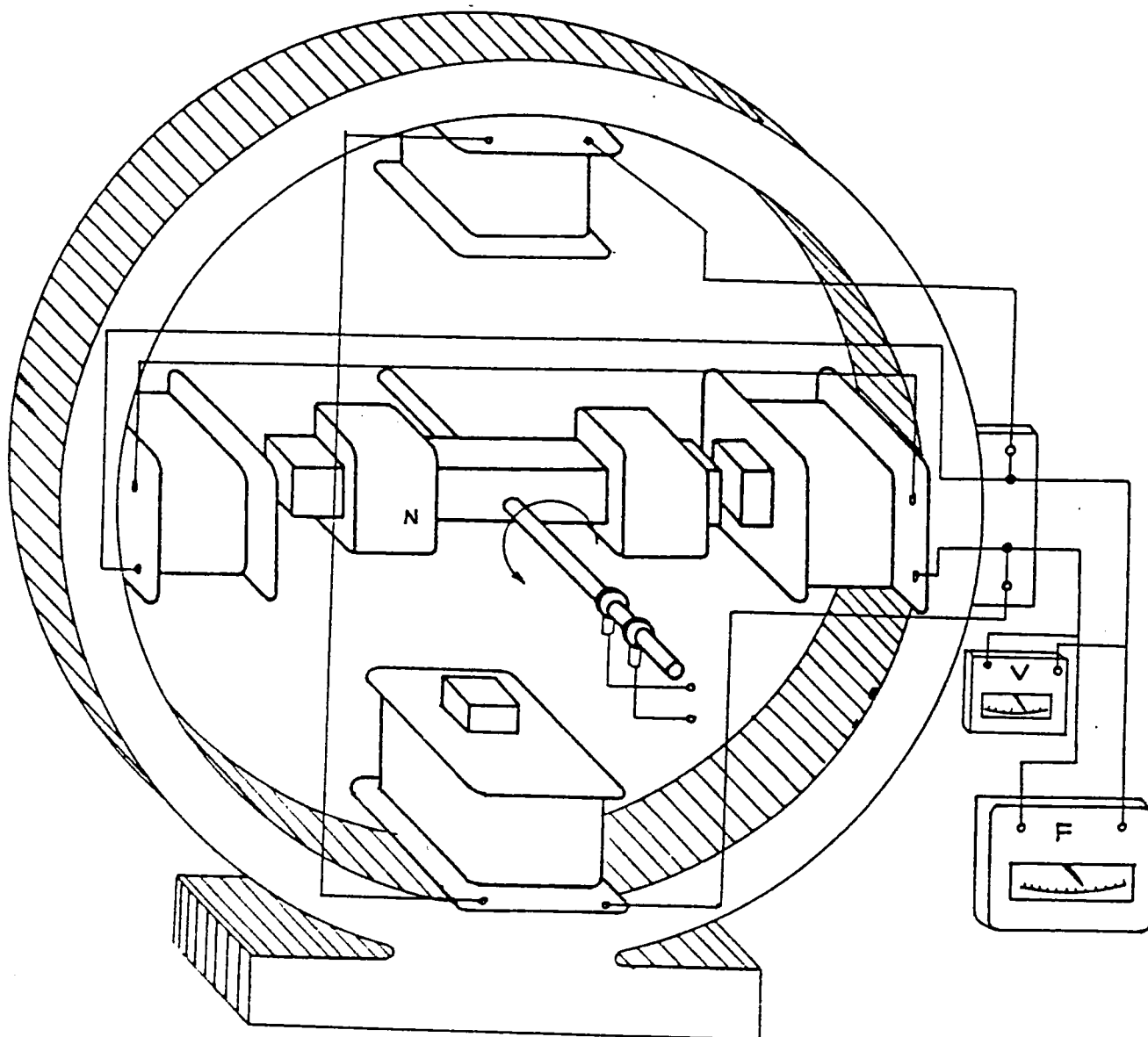


FIGURA 12. Conexión de los dos nuevos bobinados del inducido  
 \* Agrupados en serie como los dos primeros.  
 \* Introducir el segundo grupo en paralelo con el primero invirtiendo el uno con relación al otro.

- Compare las magnitudes de voltajes obtenidos en cada caso. Qué puede concluir?

- Un conductor corta un flujo a una razón promedio de 150.000 líneas por segundo. Determínese la tensión inducida promedio en el conductor.

## 6. BIBLIOGRAFIA

AGUILAR, Emery. Motores y generadores eléctricos.

CHESTER L., Dawes. Tratado de electricidad I. Corriente continua. Editorial Gustavo Gili, S.A. pp.394 - 399

COLLINS. Fundamentos de electricidad. Corriente alterna.

SEARS. Campos y ondas electromagnéticas.

CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DE OCCIDENTE

PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRICA

LABORATORIO DE CONVERSION DE ENERGIA

PRACTICA No.3

PUESTA EN MARCHA DEL ALTERNADOR DIDACTICO

#### 1. OBJETIVOS

- Conocer y aplicar el método de puesta en marcha de un alternador.
- Conocer los diferentes tipos de alternadores y sus formas de excitación.

#### 2. CONCEPTOS BASICOS

Los alternadores se fabrican de dos tipos principales: de inducido giratorio y campo inductor fijo como lo muestra la Figura 13; de



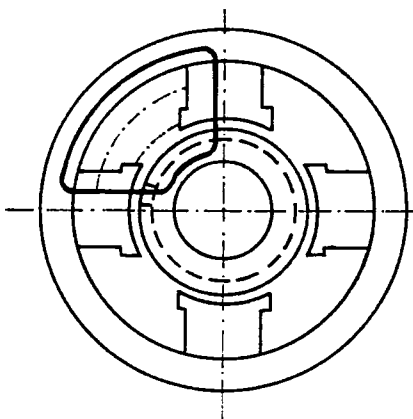


FIGURA 13. Alternador de inducido giratorio e inductor fijo

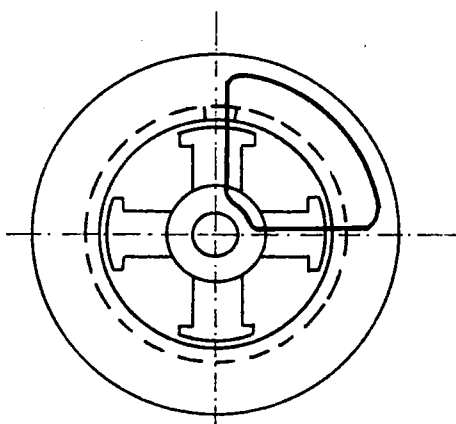


FIGURA 14. Alternador de campo inductor giratorio e inducido fijo

campo giratorio e inducido fijo ( este tipo se observa en la Figura 14 ).

En la actualidad los alternadores de campo giratorio se utilizan con mucha frecuencia debido a la facilidad con que puede tomarse de la máquina una corriente alta de carga sin necesidad de anillos colectores ni de contactos deslizantes de ninguna clase y además excitar la máquina con tensión DC en los anillos del rotor es más fácil que extraer carga a tensión elevada por estos.

#### TIPOS DE EXCITACION DEL CAMPO

Teniendo en cuenta que en el circuito de campo tiene que utilizarse corriente continua ( DC ), ésta es suministrada por un generador de corriente continua llamado excitatriz que puede estar activado por el mismo eje del alternador; en este caso será un alternador auto excitado. La Figura 15 nos muestra un alternador auto excitado.

La fuerza de excitación la puede aportar un generador de corriente continua movido separadamente por una fuerza primaria, en este caso el alternador será de excitación independiente.

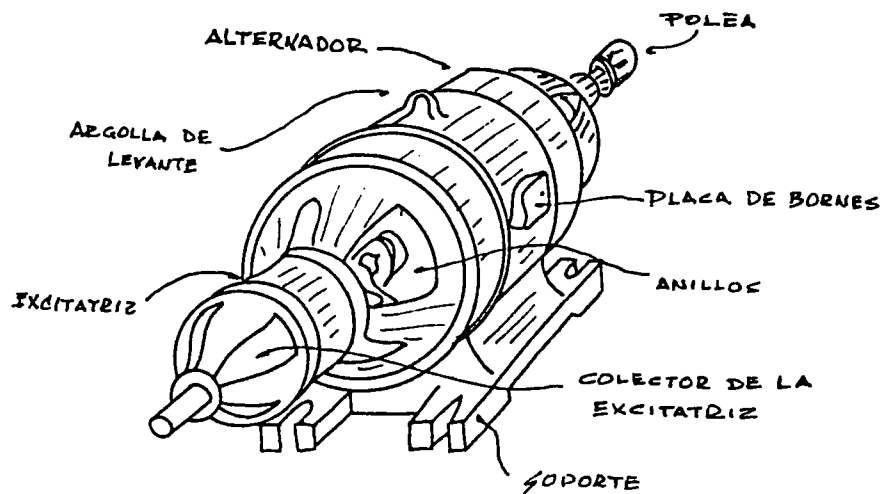


FIGURA 15. Aspecto de un grupo alternador ( pequeña potencia )

### 3. EQUIPO UTILIZADO

- Alternador didáctico
- Dos ( 2 ) fuentes reguladas DC
- Reóstato 300      - 300 W - 1A
- Un (1) amperímetro DC de 0 - 1A
- Un ( 1 ) voltímetro AC de 0 - 150 V
- Un ( 1 ) tacómetro
- Cables de conexión

#### 4. PROCEDIMIENTO

##### 4.1 PUESTA EN MARCHA CON EXCITACION INDEPENDIENTE

- Efectúe el montaje mostrado en la Figura 16.
- Alimente el campo inductor con una fuente independiente hasta obtener 0.4 A.
- Ponga en marcha la máquina motriz lentamente hasta alcanzar su velocidad nominal de 1800 RPM. Esto se consigue regulando la fuente de alimentación para la máquina motriz.
- Ajuste la excitación del campo inductor hasta obtener una  $I_{exc}$  de 0.8 A.
- Verifique la velocidad del alternador y haga el ajuste correspondiente para que sea de 1800 RPM.
- Mida la fem inducida.

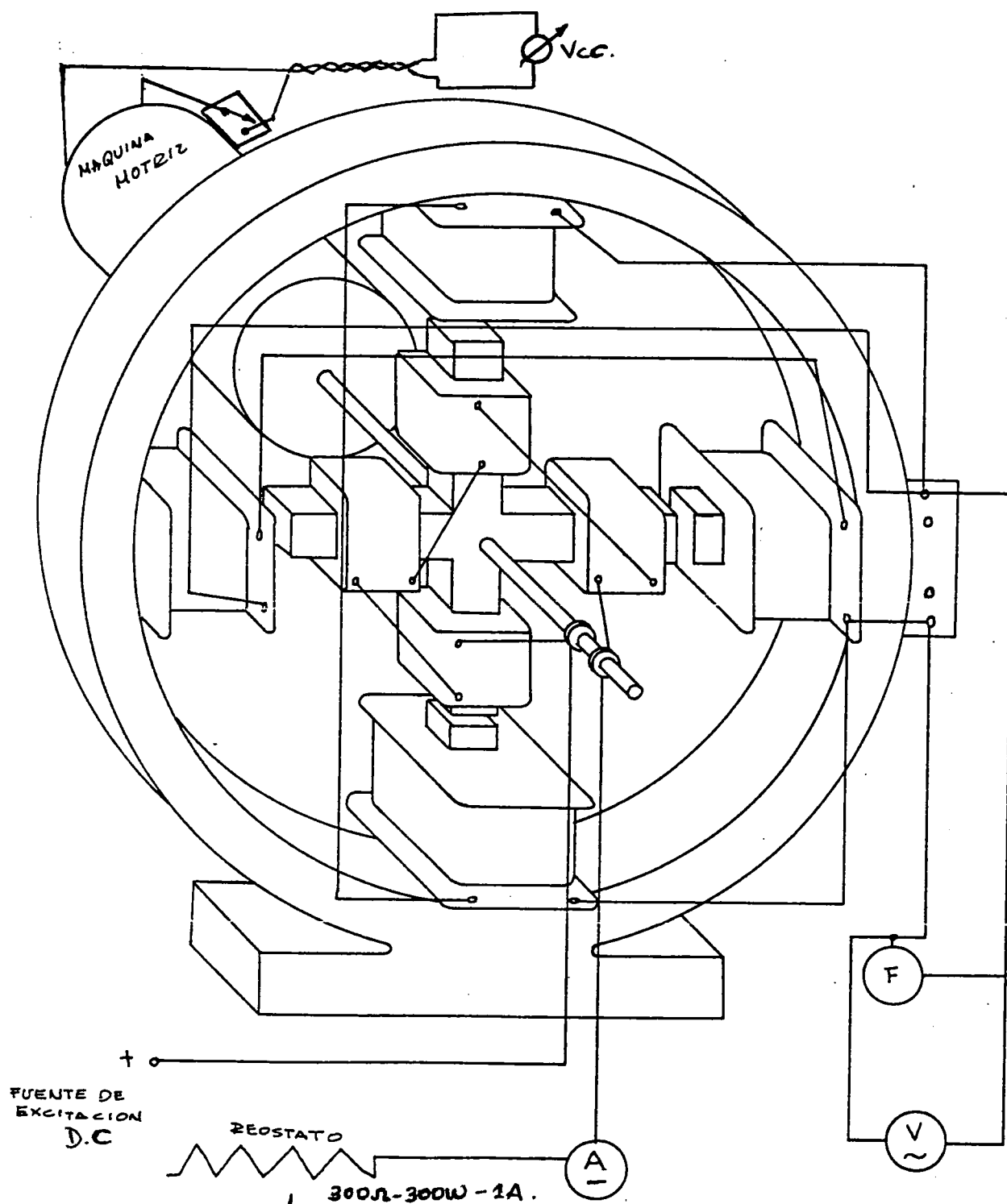


FIGURA 16. Puesta en marcha con excitación independiente

#### 4.2 PUESTA EN MARCHA DEL ALTERNADOR AUTOEXCITADO

- Monte el alternador didáctico según la Figura 16 cambiando la fuente de excitación independiente por la máquina excitatriz ( generador de corriente continua ).
- Ajuste el reóstato del circuito del campo inductor a su resistencia máxima.
- Ponga en marcha la máquina motriz lentamente observando que la  $I_{exc}$  no sea mayor de 0.8 A. Debe ir regulando la  $I_{exc}$  ( ajustando el reóstato ) hasta alcanzar la velocidad nominal.
- Mida la fem inducida.

#### 5. INFORME

- Indique el procedimiento para la puesta en marcha del alternador didáctico según las formas de excitación.
- Indique el procedimiento para la puesta en marcha de un alternador en una central generadora.

- Haga comparación entre el procedimiento utilizado en el laboratorio y el utilizado en una central generadora para la puesta en marcha de un alternador.

## 6. BIBLIOGRAFIA

ENCICLOPEDIA CEAC DE ELECTRICIDAD. Máquinas de corriente alterna. Ediciones CEAC. Barcelona. 4a. Ed. 1982. pp.249-252.

CROFT, T. Manual del montador electricista. Reverté S.A. pp. 7:46 - 7:52

CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DE OCCIDENTE

PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRICA

LABORATORIO DE CONVERSION DE ENERGIA

PRACTICA No. 4

EFFECTOS DE LA VARIACION DE VELOCIDAD SOBRE LA  
FRECUENCIA DE GENERACION

#### 1. OBJETIVOS

- Calcular la frecuencia a diferentes velocidades.
- Efectuar las mediciones de frecuencia cuando se varía la velocidad, verificando los cálculos.
- Estudiar los parámetros de los cuales depende la frecuencia de un alternador.



## 2. CONCEPTOS BASICOS

La frecuencia del alternador está en función directa de la velocidad y el número de polos del circuito de campo.

La frecuencia más usada en nuestro medio es de 60 ciclos por segundo. En otros países trabajan con frecuencias de 50 y 25 ciclos por segundo.

En el funcionamiento de los alternadores es necesario mantener la frecuencia constante, esto se logra con un regulador sensible de control de fuerza primaria que mueve el alternador.

Si se conoce el número de polos de campo de un alternador determinado, resulta fácil encontrar la frecuencia a una velocidad determinada.

$$f = \frac{P \times N}{60}$$

En donde:

f = frecuencia en ciclos por segundo

P = pares de polos

N = velocidad en revoluciones por minuto

60 = segundos en un minuto

Trasponiendo términos de esta ecuación se obtiene la velocidad necesaria para que produzca una frecuencia determinada.

$$N = \frac{60 \times f}{P}$$

Quando se quiere calcular la frecuencia utilizando el número de polos de la máquina y no el número de pares de polos, la fórmula se expresa así:

$$f = \frac{P \times N}{2 \times 60}$$

$$f = \frac{P \times N}{120}$$

Donde:

$P$  = número de polos

Si el inductor da una vuelta, la aguja se desvía en un sentido y regresa a cero. Estas variaciones corresponden a un ciclo ( Ver Figura 17 ).

Si estas variaciones se efectúan en un segundo, se dice que la corriente tiene la frecuencia de un ciclo.

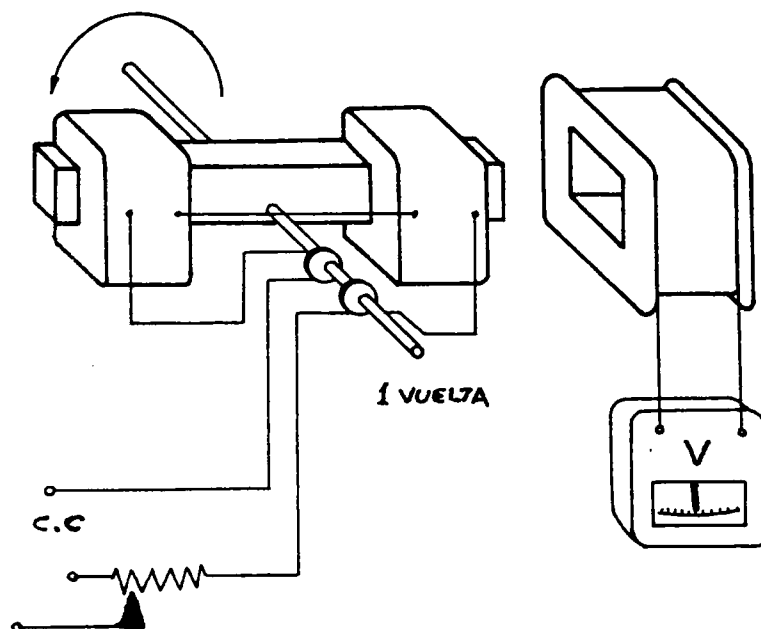


FIGURA 17. Inductor dando una vuelta

Para que la frecuencia sea de 60 ciclos por segundo, el inductor debe dar 60 vueltas por segundo, o sea:  $60 \times 60 = 3.600$  vueltas por minuto. Esto si la máquina es de dos polos ( Ver Figura 18 )

### 3. EQUIPO UTILIZADO

- Alternador didáctico
- Frecuenciómetro digital
- Un ( 1 ) voltímetro AC de 0 - 120 V

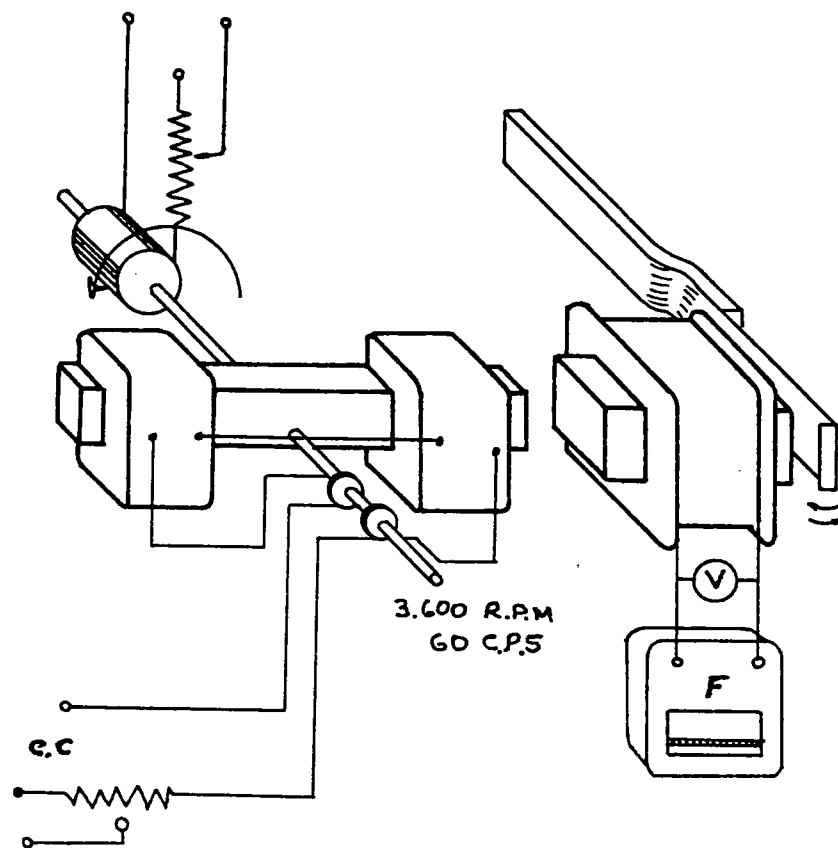


FIGURA 18. Frecuencia según la velocidad

- Dos ( 2 ) fuentes reguladas DC de 0 - 150 VDC
- Un ( 1 ) amperímetro DC de 0 - 1 A
- Un ( 1 ) reóstato de 300      - 300 W - 1 A
- Un ( 1 ) tacómetro
- Cables de conexión

#### 4. PROCEDIMIENTO

- Efectúe el montaje ilustrado en la Figura 19
- Ponga en marcha el alternador ( Práctica No.3 ) hasta obtener velocidades de 500 - 800 - 1.000 - 1.200 - 1.400 - 1.600 - 1.800 RPM  
Para cada velocidad mida la frecuencia y la tensión incluida.

#### 5. INFORME

Calcule la frecuencia con las siguientes velocidades 500 - 800 -  
1.000 - 1.200 - 1.600 - 1.800 RPM manteniendo  $n = 2$  y

- Compare los valores calculados con los obtenidos en la práctica y concluya.
- Qué se debe hacer cuando en una central generadora se presenta una variación brusca de frecuencia?
- Indique los parámetros de los cuales depende la frecuencia del alternador.
- Cuál es la frecuencia de un alternador de 8 polos que gira a

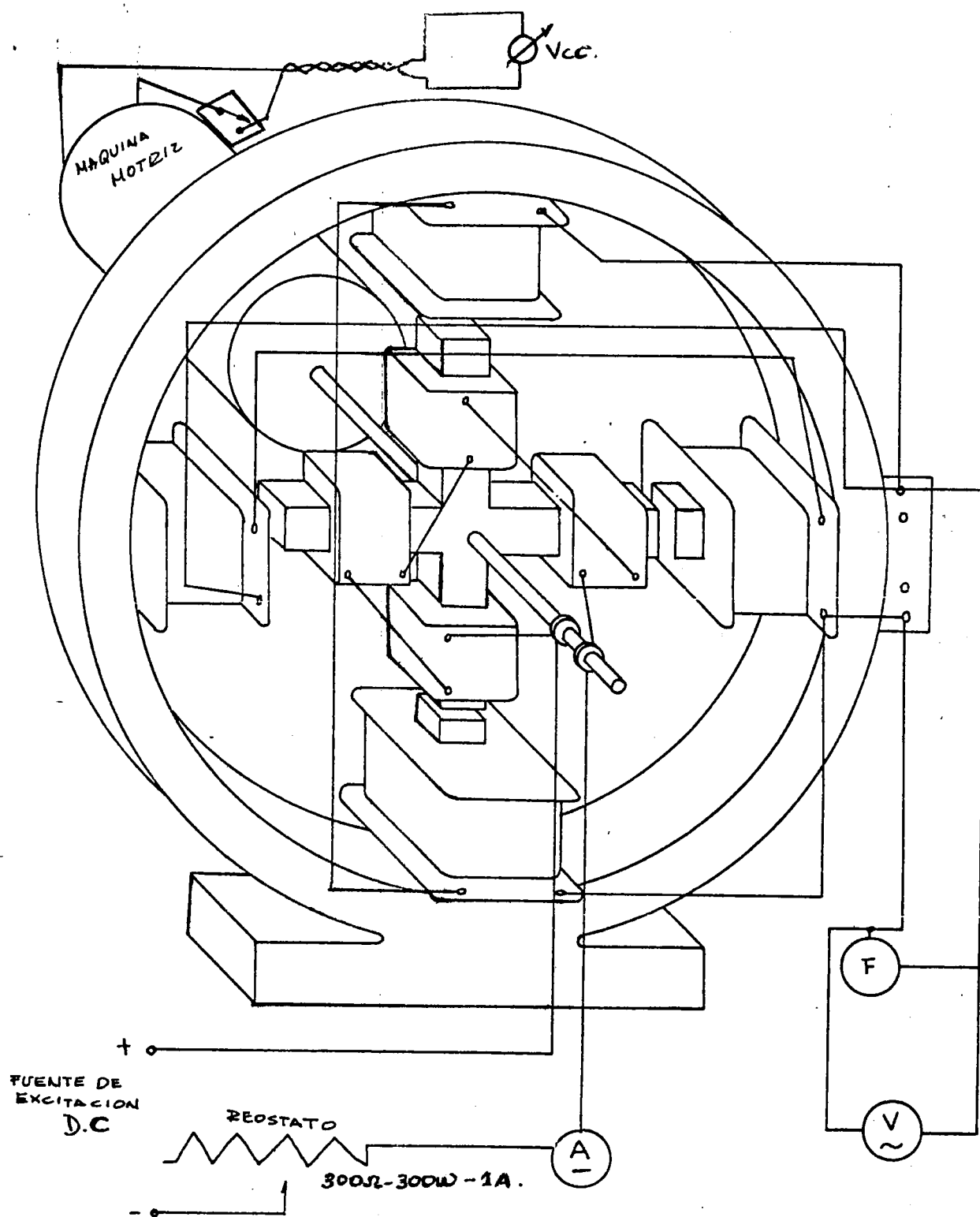


FIGURA 19. Variación de la frecuencia al cambio de velocidad

1.500 RPM

## 6. BIBLIOGRAFIA

CHESTER L., Dawes. Tratado de electricidad II. Corriente alterna. Editorial Gustavo Gili, S.A. pp.6 - 8

CORTES, Manuel. Curso moderno de máquinas eléctricas rotativas. Tomo IV. Editoriales Técnicos Asociados S.A.

CROFT, T. Manual del montador electricista. Editorial Reverté S.A. pp. 7:46 - 7:52

CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DE OCCIDENTE

PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRICA

LABORATORIO DE CONVERSION DE ENERGIA

PRAC TICA No. 5

EFECTOS DE LA FRECUENCIA VARIANDO EL NUMERO DE POLOS

## 1. OBJETIVOS

- Calcular la frecuencia variando el número de polos
- Efectuar mediciones de frecuencia en un alternador variando el número de polos manteniendo la velocidad constante.

## 2. CONCEPTOS BASICOS

Como ya se explicó en la Práctica No.4, la frecuencia de la corriente alterna generada por el alternador depende de la cantidad de polos y de la velocidad del rotor.



Cuando un rotor ha girado hasta que dos polos adyacentes del rotor ( norte y sur ) hayan atravesado un mismo bobinado, la tensión inducida en ese bobinado habrá variado un ciclo completo de 360 grados eléctricos. Cuanto más polos haya, menor será la velocidad de rotación para una frecuencia dada. La máquina de dos polos debe girar a doble velocidad que la de cuatro polos para producir la misma frecuencia.

Entonces podemos decir que la frecuencia en ciclos por segundo es la cantidad de pares de polos por los que un conductor pasa en un segundo.

En el caso de un alternador bipolar que tenga que funcionar a una frecuencia de 60 ciclos por segundo, la velocidad correcta será:

$$N = \frac{60 \times f}{P}$$

$$N = \frac{60 \times 60}{1} = 3.600 \text{ RPM}$$

Si la máquina fuera cuadripolar funcionando a la misma frecuencia, tenemos:

$$N = \frac{60 \times 60}{2} = 1.800 \text{ RPM}$$

Lo anterior se sintetiza en la siguiente tabla llamada Tabla de Velocidades de Sincronismo.

TABLA DE VELOCIDADES DE SINCRONISMO

Número de polos	Velocidad en revoluciones por minuto		
	60 ciclos	50 ciclos	25 ciclos
2	3.600	3.000	1.500
4	1.800	1.500	750
6	1.200	1.000	500
8	900	750	375
10	720	600	300

### 3. EQUIPO UTILIZADO

- Alternador didáctico
- Una ( 1 ) fuente regulada DC 0 - 150 V
- Un ( 1 ) excitatriz
- Un ( 1 ) voltímetro AC 0 - 150 V

Un ( 1 ) frecuencímetro

- Un ( 1 ) amperímetro DC 0 - 1 A
- Un ( 1 ) reóstato 300 - 300 W - 1 A
- Un ( 1 ) tacómetro

- Cables de conexión

#### 4. PROCEDIMIENTO

- Monte el alternador didáctico como lo muestra la Figura 20 conectando los cuatro polos en serie.
- Ponga en marcha el alternador didáctico autoexcitado. Obtenga una velocidad de 1.800 RPM. Mida la fem inducida y la frecuencia de dicha fem.
- Modifique el número de polos del campo inductor a 2.
- Repita el segundo paso.

#### 5. INFORME

- Compare los valores obtenidos en los puntos 2 y 4 de la práctica.
- Calcule la frecuencia para dos y cuatro polos para una velocidad de 1.800 RPM. Compare estos valores con los obtenidos en la práctica y concluya.

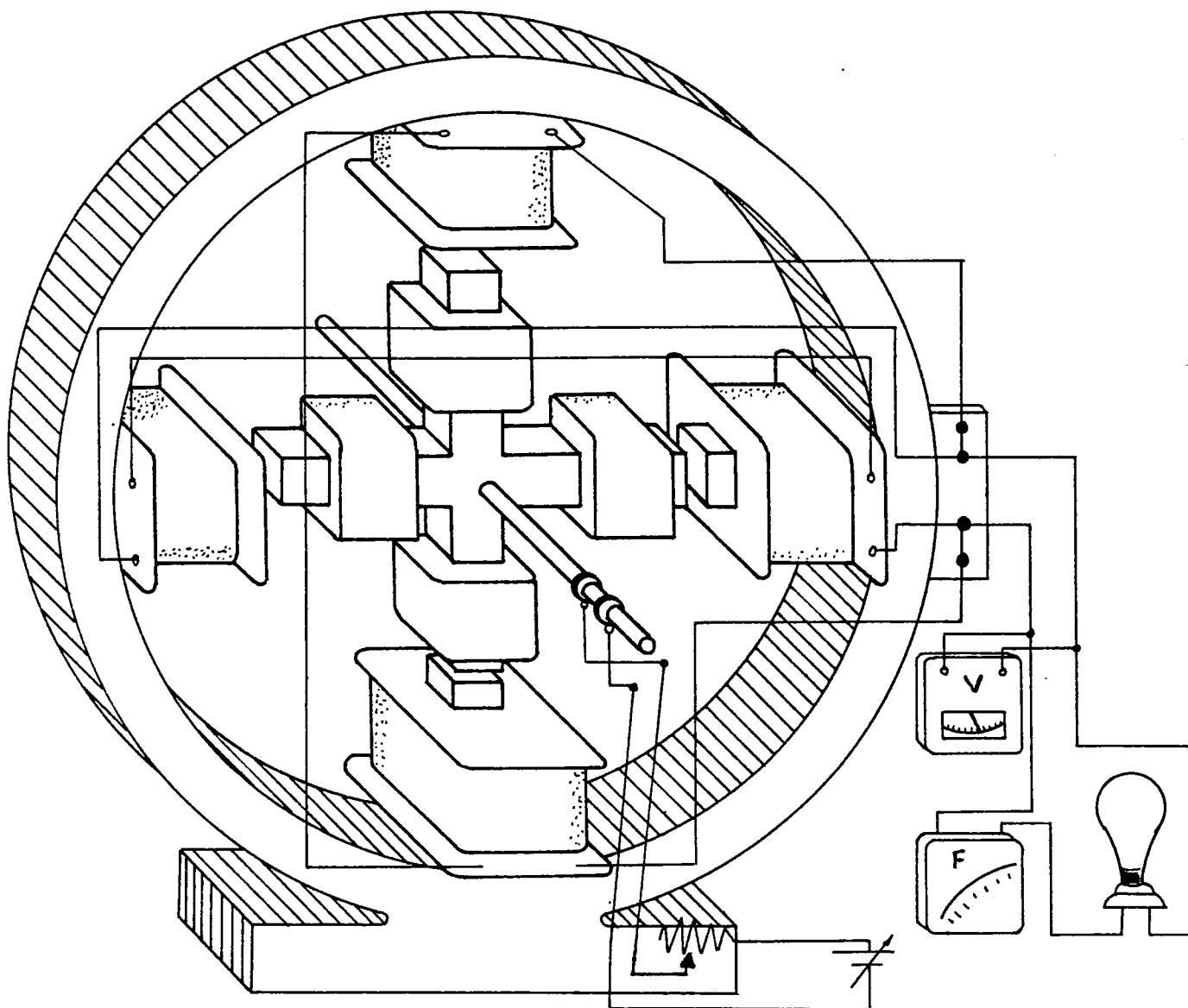


FIGURA 20. Máquina de cuatro polos de conexión de los cuatro bobinados inductores en serie.

- Cuántos polos posee un alternador que gira a 500 RPM y que produce una corriente alterna de 25 ciclos?

## 6. BIBLIOGRAFIA

CROFT, T. Manual del montador electricista. Editorial Reverté S.A. pp. 7:46 - 7:52

WALLACE, Gray. Electrotécnica. Editorial Aguilar. pp. 261 - 262

CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DE OCCIDENTE

PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRICA

LABORATORIO DE CONVERSION DE ENERGIA

PRACTICA No.6

EFECTOS DE LA VARIACION DE CARGA EN LA TENSION  
GENERADA

## 1. OBJETIVOS

- Analizar los efectos de variación de carga en un alternador.
- Describir el procedimiento para contrarrestar los efectos de una variación de carga de un alternador.

## 2. CONCEPTOS BASICOS

A los generadores de las centrales eléctricas se les exige que mantengan la tensión sensiblemente constante. Estando sometidos los

mismos a continuas variaciones de carga, se precisa por consiguiente una regulación también continua de la excitación. Al oscilar la carga, la excitación tiene que variarse en cuantía sensiblemente superior. En el alternador didáctico, la regulación de la intensidad de excitación se hace por medio de un reostato.

### 3. EQUIPO UTILIZADO

- Alternador didáctico
- Una ( 1 ) fuente regulada ( 0 - 150 V )
- Un ( 1 ) voltímetro 300 V - 4 A
- Un ( 1 ) voltímetro AC ( 0 - 150 V )
- Un ( 1 ) amperímetro DC ( 0 - 1 A )
  
- Un ( 1 ) amperímetro AC
- Tres ( 3 ) lámparas de 25 x - 110 V
- Un ( 1 ) reóstato 300      - 300 w - 1 A
- Un ( 1 ) tacómetro
- Cables de conexión

### 4. PROCEDIMIENTO

- Monte el alternador didáctico según la Figura 21 cambiando la

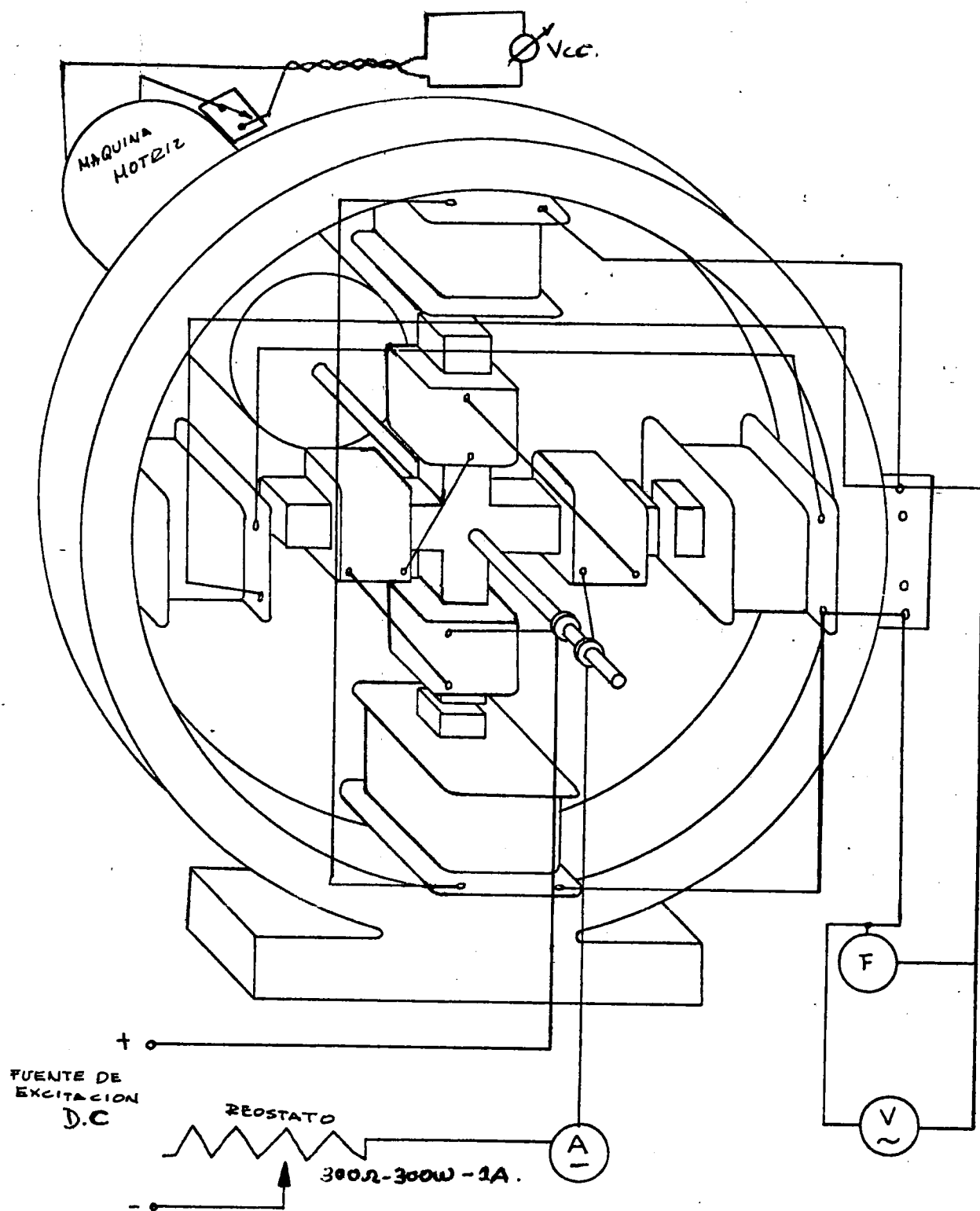


FIGURA 21. Efectos de la variación de carga



fuelle de excitación independiente por la máquina excitatriz ( generador de corriente continua ).

- Ponga en marcha la máquina hasta alcanzar 1.800 RPM y 100 V de fem inducida.

- Conecte en los bornes de salida una carga ( 1 lámpara de 25 W ), mida la fem inducida, la potencia consumida, corriente de la carga, la velocidad. Elabore una tabla con estos valores.

- Aumente la carga a dos lámparas conectadas en paralelo, mida la fem inducida, la potencia consumida, la corriente de la carga, la velocidad, elabore una tabla con estos valores.

- Ajuste el valor de velocidad a 1.600 RPM y 70 V de fem inducida. Repita los pasos 3 y 4.

- Aumente de nuevo a 1.800 RPM y 70 V de fem inducida. Conservando la carga, elabore una tabla con los resultados de corriente de carga, corriente de excitación, velocidad y fem inducida obtenidos.

## 5. INFORME

- Compare los resultados obtenidos en 3 y 4 para ambos casos y concluya.
  
- Compare los resultados obtenidos en 3 y 4 con los de 6 y concluya.
  
- Cuál es el procedimiento empleado para contrarrestar los efectos de una variación de carga en una central generadora?
  
- Cuáles son los efectos que produce una variación de carga en un alternador?
  
- Describa los principales métodos utilizados para regular la tensión en un alternador?

## 6. BIBLIOGRAFIA

ENCICLOPEDIA CEAC. Máquinas de corriente alterna. Ediciones CEAC S.A. 4a. Ed. 1983. pp.453 - 466

CROFT, Terrel. Manual del montador electricista. Editorial Reverté. S.A. Barcelona.

CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DE OCCIDENTE

PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRICA

LABORATORIO DE CONVERSION DE ENERGIA

PRACTICA No. 7

GENERADORES TRIFASICOS

### 1. OBJETIVOS

- Estudiar las características principales de los alternadores trifásicos.
- Analizar las diferentes formas de construcción de un alternador polifásico.

### 2. CONCEPTOS BASICOS

Los alternadores se construyen de inducido giratorio e inductor fijo y de inductor móvil o inducido fijo, haremos énfasis en este último ya

que es el más utilizado. Los sistemas de este tipo son por lo general bifásicos o trifásicos, siendo el más usado el trifásico.

## 2.1 ALTERNADOR BIFASICO

En el alternador bifásico hay dos bobinados monofásicos espaciados de manera que la tensión alterna inducida en uno de ellos esté  $90^\circ$  fuera de fase con la tensión inducida en el otro.

Los bobinados están estrictamente separados entre sí. La única manera de obtener una diferencia de fase de  $90^\circ$  consiste en espaciar los bobinados de manera que mientras uno de ellos es atravesado por un flujo de campo máximo, el otro lo sea por un flujo cero.

En la Figura 22 podemos ver un alternador bipolar bifásico. El estator consiste en dos bobinados monofásicos completamente independientes. Cada bobinado consta de una serie de dos bobinados que están en fase y conectados de manera que sus voltajes se suman. El rotor es idéntico al empleado en cualquier alternador monofásico.

En el esquema A los polos del rotor están frente a los bobinados de la fase A. Por lo tanto la tensión inducida en la fase A es máxima y la inducida en la fase B es cero. Cuando el rotor sigue girando, se

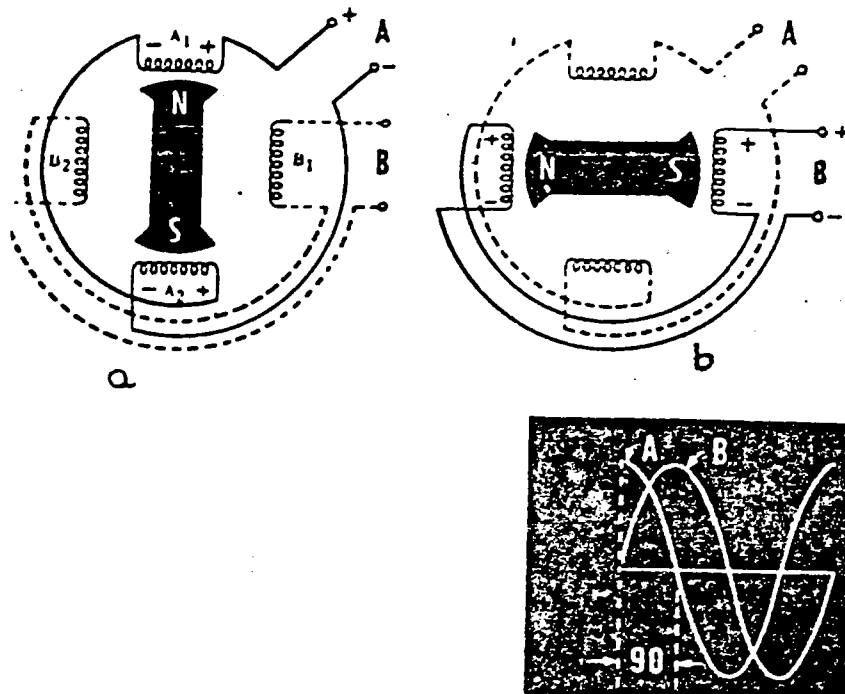


FIGURA 22. Alternador dipolar bifásico

aleja de los bobinados A y se acerca a los B. A raíz de esto la tensión inducida en la fase A disminuye desde su valor máximo y la inducida en la fase B asciende desde cero.

En el esquema b los polos del rotor están frente a los bobinados de la fase B. Ahora la tensión inducida en la fase B es máxima, mientras la inducida en la fase A ha caído a cero. El diagrama c de las ondas muestra las tensiones inducidas en las fases A y B para un ciclo completo.

En conclusión, el sistema bifásico ilustra dos factores importantes:

- Los voltajes inducidos tienen una magnitud igual cuando las bobinas son idénticas.
- Los dos voltajes tienen la misma frecuencia y amplitud, pero están a  $90^\circ$  fuera de fase.

## 2.2 ALTERNADOR TRIFÁSICO

El alternador trifásico como su nombre lo indica, tiene tres bobinas monofásicas espaciadas de manera que la tensión inducida en cualquiera de ellos tiene un desplazamiento de fase de  $120^\circ$  con respecto a las otras dos.

El esquema del estator trifásico que mostrase todas las bobinas sería muy complejo y resultaría difícil de interpretar. Es por esta razón que en la Figura 23 se representa un esquema simplificado, donde se pueden ver todos los bobinados de una sola fase agrupados como uno solo. Las ondas de voltaje generadas en cada fase aparecen en el mismo gráfico con un desplazamiento de  $120^\circ$  entre ellas.

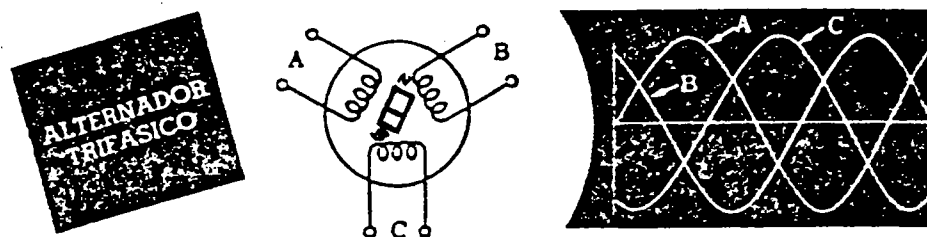


FIGURA 23. Esquema simplificado de un alternador trifásico

### 3. EQUIPO UTILIZADO

- Alternador didáctico
- Una ( 1 ) fuente regulada 0 - 150 VD.€
- Tres ( 3 ) lámparas de 100 w - 220 V
- Un ( 1 ) voltímetro AC 0 - 250 V
- Un ( 1 ) amperímetro DC 0 - 1 A
- Un ( 1 ) reóstato 300 - 300 w - 1 A
- Un ( 1 ) tacómetro

- Un ( 1 ) amperímetro AC 0 - 2 A
- Cables de conexión

#### 4. PROCEDIMIENTO

- Monte el alternador según disposición de la Figura 24
- Ponga en marcha el alternador hasta alcanzar 1.800 RPM y 0.8 A  $I_{exc}$ . Mida la fem inducida.
- Abra el circuito de alimentación de la máquina motriz y adicione una bobina al estator de tal manera que quede a  $120^\circ$  de la primera así como lo ilustra la Figura 25
- 
- Repita el paso 2 midiendo la tensión inducida en las dos bobinas.
- Abra el circuito de alimentación a la máquina motriz, adicione una tercera bobina de tal manera que quede a  $120^\circ$  de la primera y de la segunda. Así como lo ilustra la Figura 26, mida las tres tensiones inducidas.



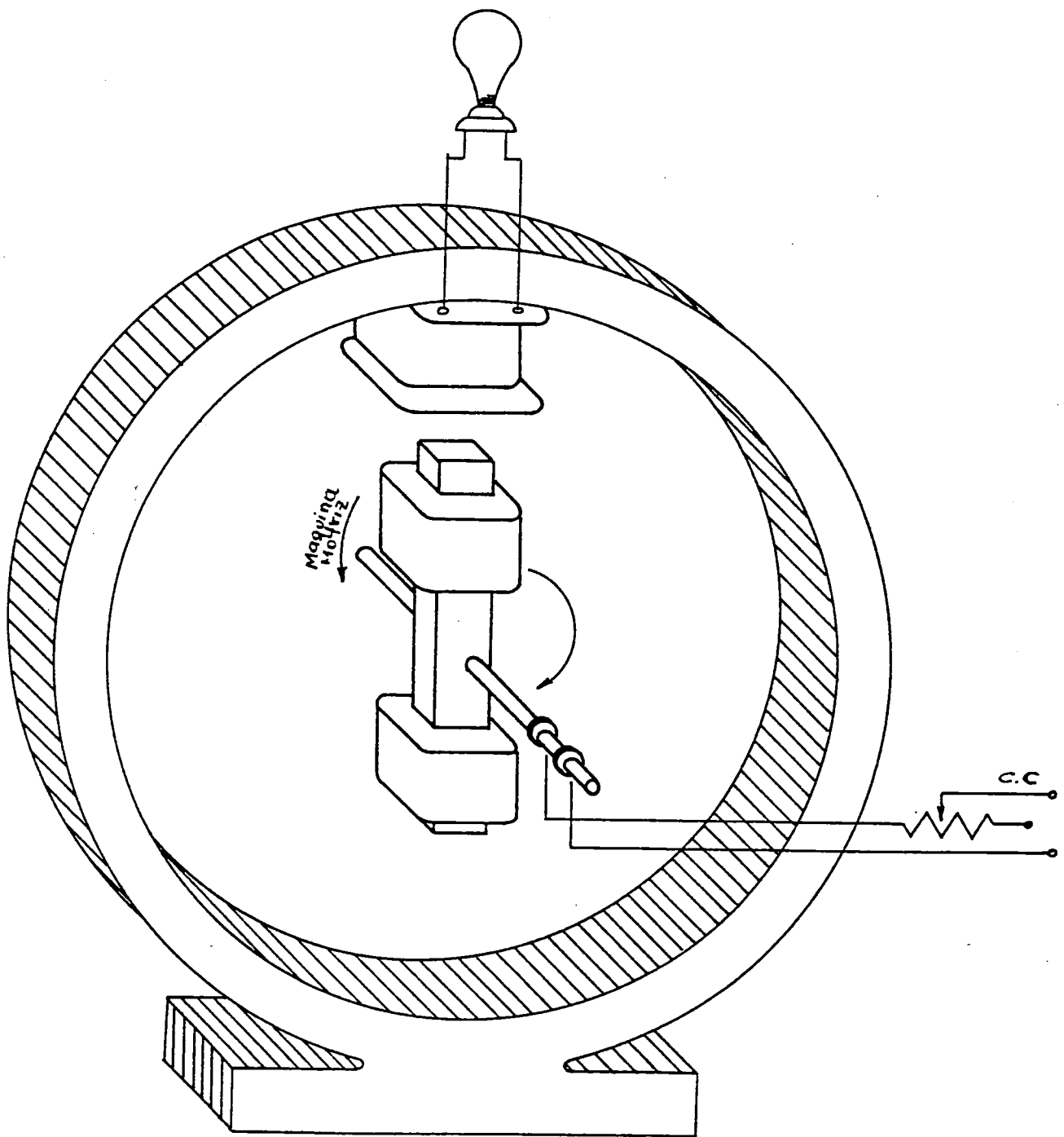


FIGURA 24. Fem inducida en una bobina del estator

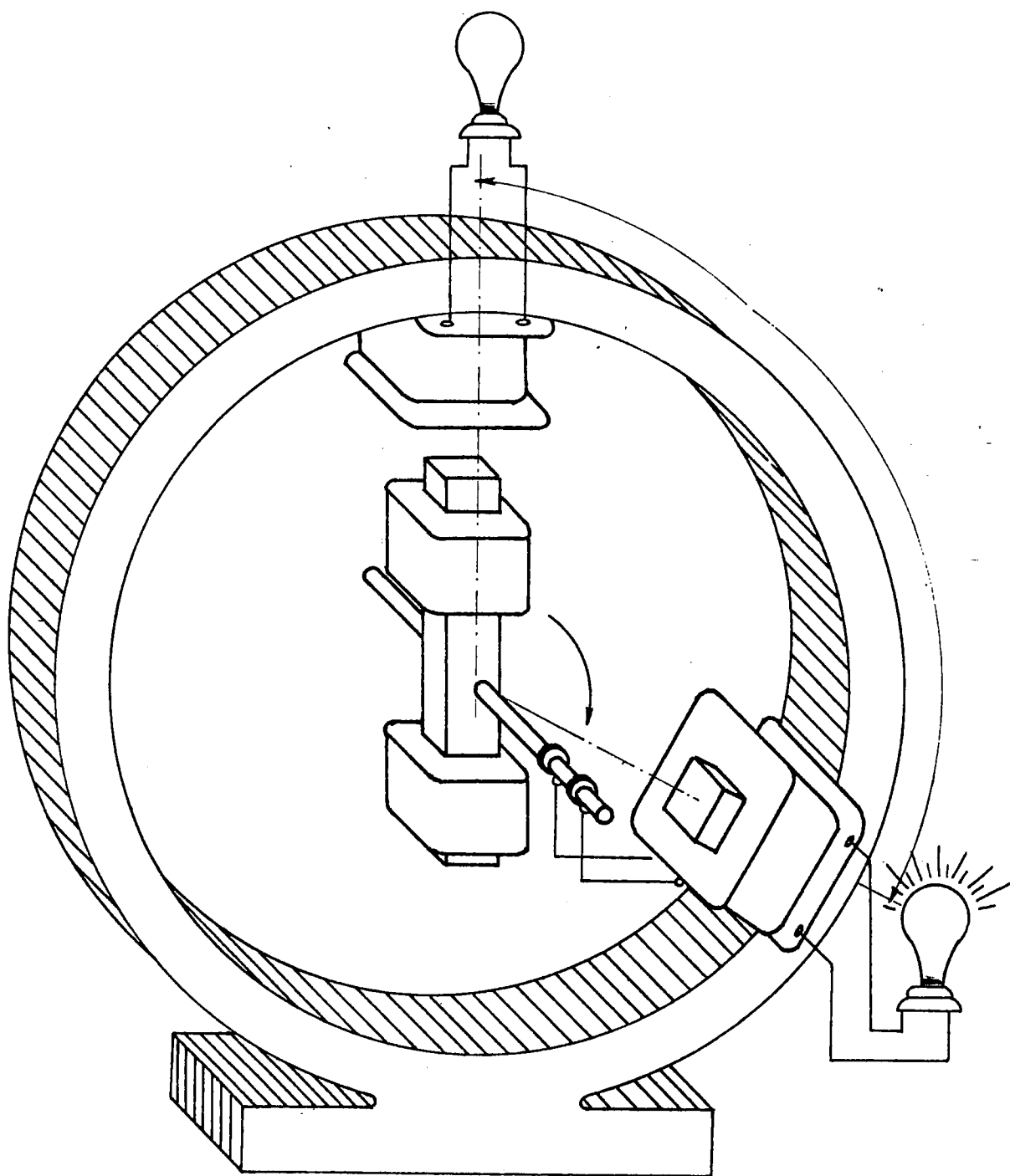


FIGURA 25.. Un segundo bobinado a  $120^\circ$  del primero, será el origen de una segunda corriente alterna

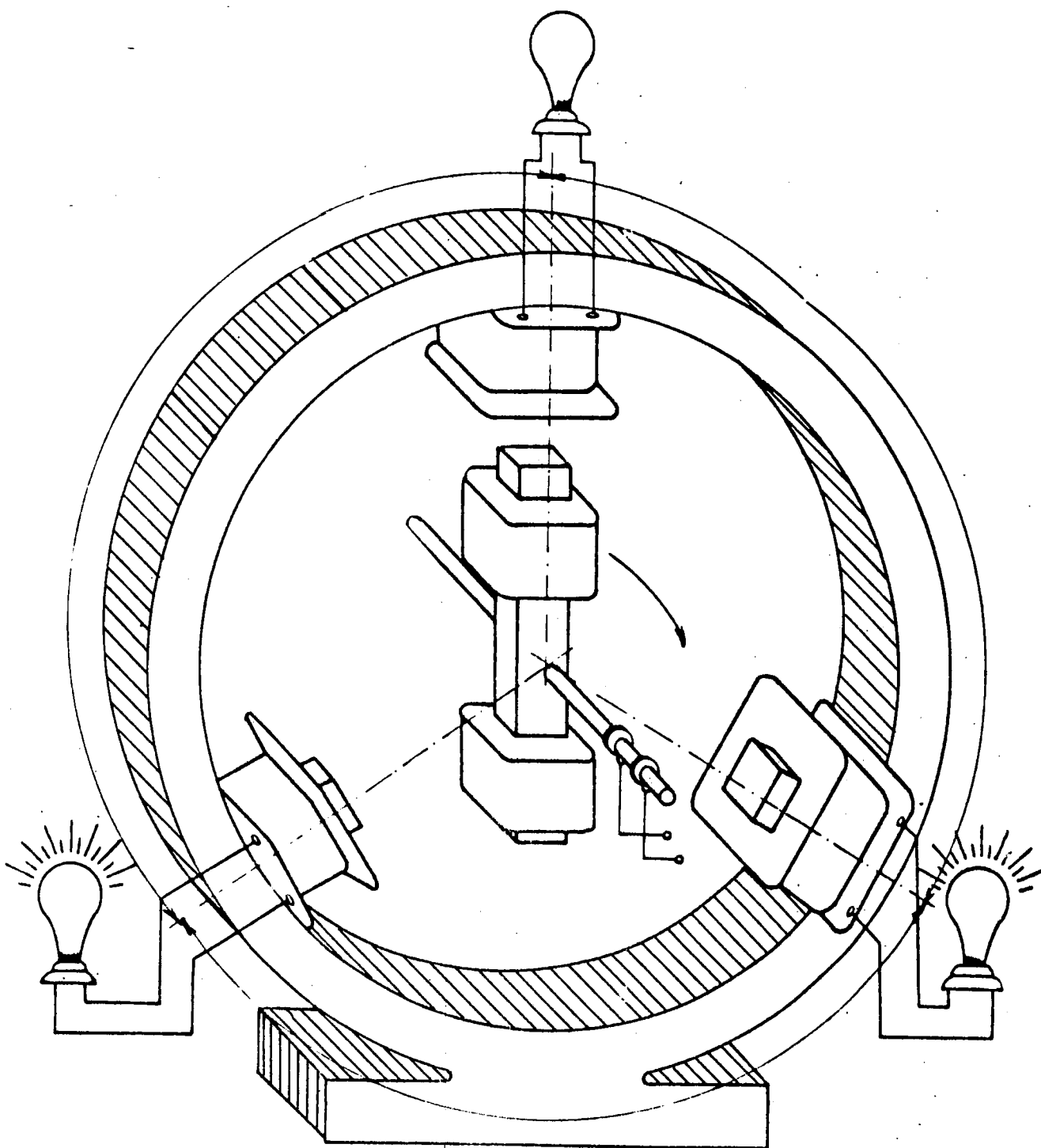


FIGURA 26. Un tercer bobinado será el origen de una tercera corriente desfasada  $\frac{1}{3}$  de ciclo con relación a la segunda y  $\frac{2}{3}$  con relación a la primera

## 5. INFORME

- Explique en qué momento la corriente es nula en cada bobinado.
- Qué nos indica en las fem inducidas la disposición a  $120^\circ$  geométricos de cada bobinado.
- De acuerdo a la pregunta anterior, elabore un gráfico de las tres fem inducidas en la máquina.
- Explique cómo se implementaría con el alternador didáctico un generador bifásico.
- Qué ventajas presenta la generación polifásica?
- Explique las conexiones trifásicas más utilizadas en alternadores.

## 6. BIBLIOGRAFIA

DUFF, Jhon R. Fundamentos de corriente alterna. Editorial Diana.

GRAY/WALLACE. Electrotécnica. Editorial Aguilar. pp.337 - 365

CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DE OCCIDENTE

PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRICA

LABORATORIO DE CONVERSION DE ENERGIA

PRACTICA No. 8

CONEXION TRIFASICA EN ESTRELLA O Y DEL ALTERNADOR  
DIDACTICO

## 1. OBJETIVOS

- Realizar la conexión en estrella de un alternador trifásico e interpretar la relación de tensiones y corrientes.
- Estudiar las características principales de los alternadores conectados en estrella.

## 2. CONCEPTOS BASICOS

## 2.1 CONEXION EN ESTRELLA

La mayoría de los alternadores que se utilizan en la actualidad son máquinas de bobinados trifásicos. Esto se debe a que los alternadores trifásicos tienen mucho más rendimiento que los bifásicos o monofásicos.

Una máquina trifásica está representada adecuadamente mediante un esquema como el de la Figura 27 en la que los tres arrollamientos independientes están dispuestos de la misma forma que el diagrama vectorial de fases de la fem.

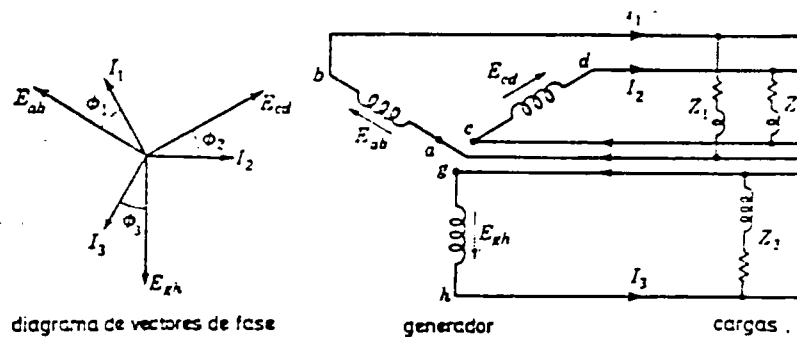


FIGURA 27. Representación esquemática de un generador trifásico

Una máquina de este tipo tiene seis terminales y seis conductores, dos para cada fase.

Para reducir el número de conductores de la línea, se reúnen generalmente los tres conductores de retorno en un conductor común, como en la Figura 28. Este conductor recibe el nombre de neutro porque normalmente está al potencial o próximo a él. Los otros tres conductores reciben el nombre de conductores de fase. El punto de unión de las tres fases del generador, al que se conecta el neutro, se llama neutro del generador.

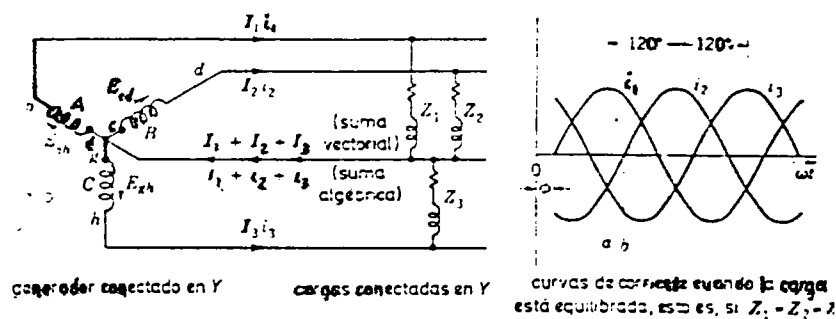


FIGURA 28. Sistema a cuatro hilos conectado en Y

La corriente en el neutro es, en cada instante, la suma algebraica de  $i_1$ ,  $i_2$  e  $i_3$ . En las curvas de la misma figura puede verse que si las tres cargas son idénticas, es decir que las tres sinusoides tienen la misma amplitud y cada una está retrasada respecto de su tensión en mismo ángulo  $\phi$ , la suma de estas tres corrientes en cada instante es cero.

En consecuencia, si las cargas están equilibradas en las tres fases

no es necesaria la instalación del neutro.

El sistema de cuatro hilos de la Figura 28 se utiliza para distribución de energía siempre que las cargas sean principalmente monofásicas, como es el caso del suministro de electricidad a zonas residenciales y en la distribución rural.

## 2.2 TENSIONES, INTENSIDADES Y POTENCIA DE UN ALTERNADOR CONECTADO EN ESTRELLA

En la Figura 29a la tensión  $E_{32}$  que el alternador trifásico aplica a la carga monofásica,  $Z_2$  es la suma vectorial de las tensiones engendradas en las fases B y C.

Esto es,  $E_{32}$  es la suma vectorial de  $E_{03}$  y  $E_{02}$ . Ahora bien:  $E_{03}$  está desfasada  $120^\circ$  respecto a  $E_{02}$ , como lo indica la Figura 29b y  $E_{30} = -E_{03}$ . Por tanto,  $E_{30}$  está desfasada  $60^\circ$  respecto a  $E_{02}$ , y puesto que  $E_{02}$  y  $E_{03}$  son iguales en magnitud a la tensión del neutro,  $E_n$ , la suma vectorial de  $E_{30}$  y  $E_{02}$  es

$$E_{32} = 2 E_n \cos 30^\circ$$

$$E_{32} = \sqrt{3} E_n$$



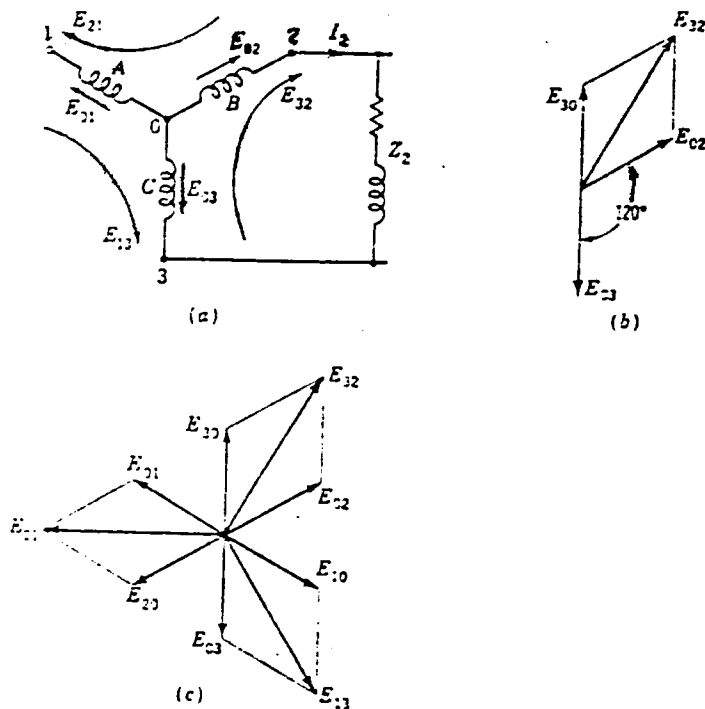


FIGURA 29. Tensiones en un alternador trifásico conectado en Y

En otras palabras, las tensiones en los conductores de la línea es

$\sqrt{3}$  veces la tensión de cada conductor y el neutro.

La Figura 29c es el diagrama completo de vectores de fase en un alternador trifásico. La comprobación de la disposición correcta de fases es la igualdad de las tensiones entre línea y línea.

Para analizar la potencia debemos hacer referencia a las Figuras 27 y 28.

$\phi_1$  = ángulo de avance a retardo de  $I_1$ , respecto a  $E_{ab}$  en la fase A

$\phi_2$  = ángulo de avance o retardo de  $I_2$ , respecto a  $E_{cd}$  en la fase B

$\phi_3$  = ángulo de avance o retardo de  $I_3$ , respecto a  $E_{gh}$  en la fase C

Estos ángulos, como los valores de  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$ , están determinados por la naturaleza de las cargas.

La potencia media en cada fase es:

$$P_1 = E_{ab} I_1 \cos \phi_1 \text{ Vatios}$$

$$P_2 = E_{cd} I_2 \cos \phi_2 \text{ Vatios}$$

$$P_3 = E_{gh} I_3 \cos \phi_3 \text{ Vatios}$$

$$\text{Potencia media total} = P_1 + P_2 + P_3 \text{ Vatios.}$$

Si las cargas están equilibradas, de modo que

$$I_1 = I_2 = I_3 = I$$

$$\phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = \phi$$

$$E_{ab} = E_{cd} = E_{gh} = E_n$$

Se tiene:

$$\text{Potencia media total} = 3 E_n I \cos \phi$$

Siendo  $E_n$  la tensión del neutro

Sea  $E$  la tensión entre los conductores de la línea, entonces  $E = \sqrt{3} E_n$

En y sustituyendo  $E$  en la ecuación anterior, se obtiene:

$$\text{Potencia media} = \sqrt{3} E. I. \cos \phi$$

### 3. EQUIPO UTILIZADO

- Alternador didáctico
- Tres ( 3 ) voltímetros AC de 0 - 250 V
- Un ( 1 ) tacómetro
- Una ( 1 ) fuente regulada de 0 - 150 VDC
- Un ( 1 ) amperímetro DC de 0 - 1 A
- Un ( 1 ) reóstato 300      - 300 w - 1 A

### 4. PROCEDIMIENTO

- Conecte los devanados del inducido como lo muestra la Figura 30
- Conecte las cuatro bobinas del rotor en serie

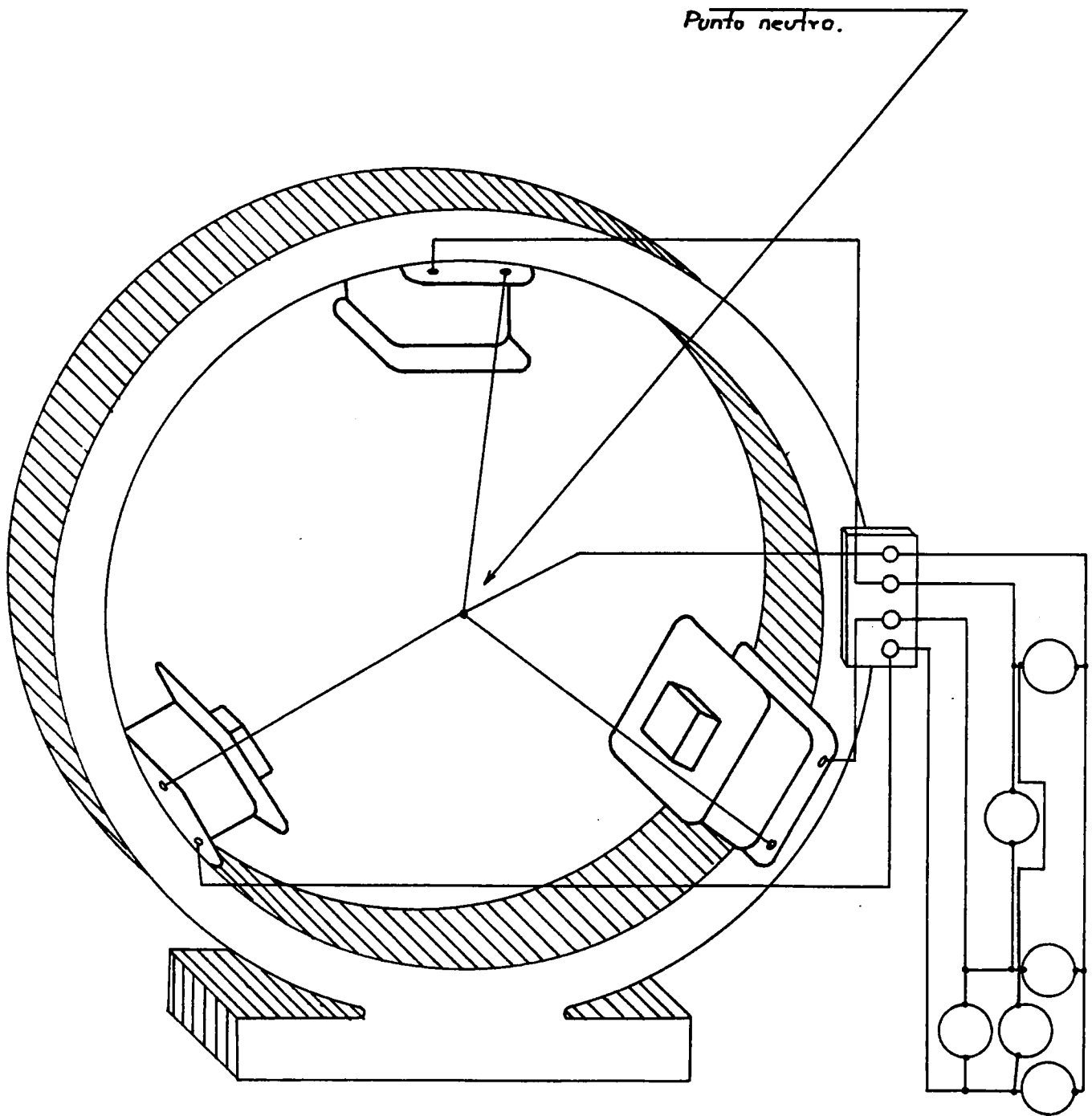


FIGURA 30. Conexión en estrella

- Ponga en marcha el alternador hasta obtener una velocidad de 1.800 RPM y mida las tres tensiones entre fases y neutro.

- Mida las tres tensiones entre fases.

## 5. INFORME

- Con los voltajes obtenidos entre fases, calcule los voltajes entre fase y neutro y elabore una tabla con los datos obtenidos.

- Con los voltajes obtenidos entre fase y neutro, calcule los voltajes entre fases.

- Compare los voltajes obtenidos en la práctica con los calculados. Concluya.

- Con los valores obtenidos realice un diagrama vectorial de fases.

- Qué ventajas y desventajas presenta la conexión en estrella?

## 6. BIBLIOGRAFIA

CHESTER L. Dawes. Tratado de electricidad II. Corriente alterna.

Editorial Gustavo Gili, S.A. pp.130 - 143.

GRAY/WALLACE. Electrotécnica. Editorial Aguilar. pp.340 - 345

CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DE OCCIDENTE

PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRICA

LABORATORIO DE CONVERSION DE ENERGIA

PRACTICA No. 9

CONEXION TRIFASICA EN TRIANGULO O DELTA DEL  
ALTERNADOR DIDACTICO

## 1. OBJETIVOS

- Realizar la conexión en triángulo de un alternador trifásico e interpretar la relación de tensiones y corrientes.
- Estudiar las características principales de los alternadores conectados en triángulo.

## 2. CONCEPTOS BASICOS

## 2.1 CONEXION EN TRIANGULO

Otro método de conectar los tres arrollamientos de la máquina trifásica es el representado en la Figura 31 donde están conectados en serie, con el terminal de salida unido al de entrada de la fase siguiente.

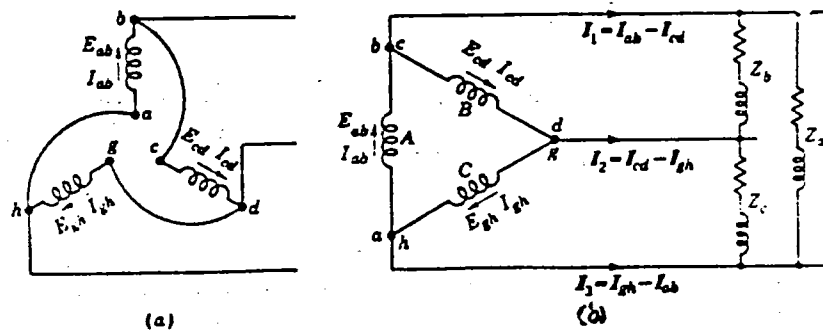


FIGURA 31. Alternador conectado en triángulo

Si se reduce a cero la longitud de los hilos que hacen estas conexiones, de modo que el punto b coincida con el punto c, el punto d con el punto g y el punto h con el punto a, el esquema se convertirá automáticamente en el de la Figura 31b.

## 2.2 TENSIONES, INTENSIDAD Y POTENCIA DE UN ALTERNADOR CONECTADO EN TRIANGULO

La diferencia fundamental entre las conexiones en estrella y en



triángulo estriba en que la primera sólo un hilo, denominado neutro, es común para las tres fases, mientras que en la conexión en triángulo cada hilo es común para dos fases. Supongamos que tres impedancias iguales  $Z_a$ ,  $Z_b$  y  $Z_c$  se conectan a las tres fases en la Figura 31b. La impedancia  $Z_a$  es la carga de la fase A,  $Z_b$  la de la fase B y  $Z_c$  la de la fase C, pero cada conductor de la línea transporta dos de estas tres corrientes.

Así por ejemplo  $i_2 = i_{cd} + i_{hg} = i_{cd} - i_{gh}$ .

Si las curvas de las corrientes son sinusoides, podemos utilizar vectores de fase para realizar la adición o la sustracción vectorialmente, como indica la Figura 32 donde  $I_{cd}$  e  $I_{gh}$  se han representado como dos corrientes iguales desfasadas  $120^\circ$ . Es evidente que por ser  $I_2 = I_{cd} - I_{gh}$ , en la Figura 32b se tiene:

$$I_2 = 2I_{cd} \cos 30^\circ = \sqrt{3} I_{cd}$$

Esto es, cuando las cargas están equilibradas, las intensidades en los hilos de la línea de una conexión en triángulo son  $\sqrt{3}$  veces las intensidades en las fases o cargas individuales. Por el contrario, las tensiones entre los conductores de la línea de un sistema conectado en triángulo son simplemente las tensiones de las

fases individuales

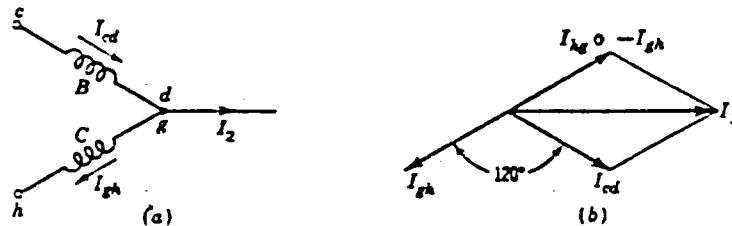


FIGURA 32. Diagrama vectorial de la conexión en triángulo

Potencia. Se hace referencia a la Figura 31b.

Sea:

$\phi_a$  = ángulo de avance o retardo de  $I_{ab}$  respecto a  $E_{ab}$

$\phi_b$  = ángulo de avance o retardo de  $I_{cd}$  respecto a  $E_{cd}$

$\phi_c$  = ángulo de avance o retardo de  $I_{gh}$  respecto a  $E_{gh}$

Estos ángulos, como también los valores de las intensidades, que dan determinados por la naturaleza de las cargas.

La potencia media en cada fase del alternador es:

$$P_A = E_{ab} I_{ab} \cos \phi_a \text{ vatios}$$

$$P_B = E_{cd} I_{cd} \cos \phi_b \text{ Vatios}$$

$$P_C = E_{gh} I_{gh} \cos \phi_c \text{ Vatios}$$

La potencia media total será:

$$P_A + P_B + P_C \text{ vatios}$$

Si las cargas están equilibradas, de modo que

$$I_{ab} = I_{cd} = I_{gh} = I'$$

$$\phi_a = \phi_b = \phi_c = \phi$$

$$E_{ab} = E_{cd} = E_{gh} = E$$

La potencia media total será:  $3EI' \cos \phi$

Sea  $I$  la corriente de los conductores de la línea. Entonces  $I =$

$\sqrt{3} I'$ . Sustituyendo este valor de  $I$  en la ecuación anterior, se obtiene:

$$\text{Potencia media} = \sqrt{3} EI \cos \phi$$

### 3. EQUIPO UTILIZADO

- Alternador didáctico  
Tres ( 3 ) voltímetros AC de 0 - 150 V
- Un ( 1 ) tacómetro
- Una ( 1 ) fuente regulada de 0 - 150 VDC
- Un ( 1 ) amperímetro DC de 0 - 1A
- Un ( 1 ) reóstato 300      - 300 w - 1A

### 4. PROCEDIMIENTO

- Conecte los devanados del inducido como lo ilustra la Figura 33.
- Conecte las cuatro bobinas del motor en serie
- Ponga en marcha el alternador didáctico, hasta alcanzar una velocidad de 1.800 RPM y mida las tres tensiones de fase.
- Mida las tres tensiones de línea.

### 5. INFORME

- Con los valores obtenidos en la práctica, realice un diagrama

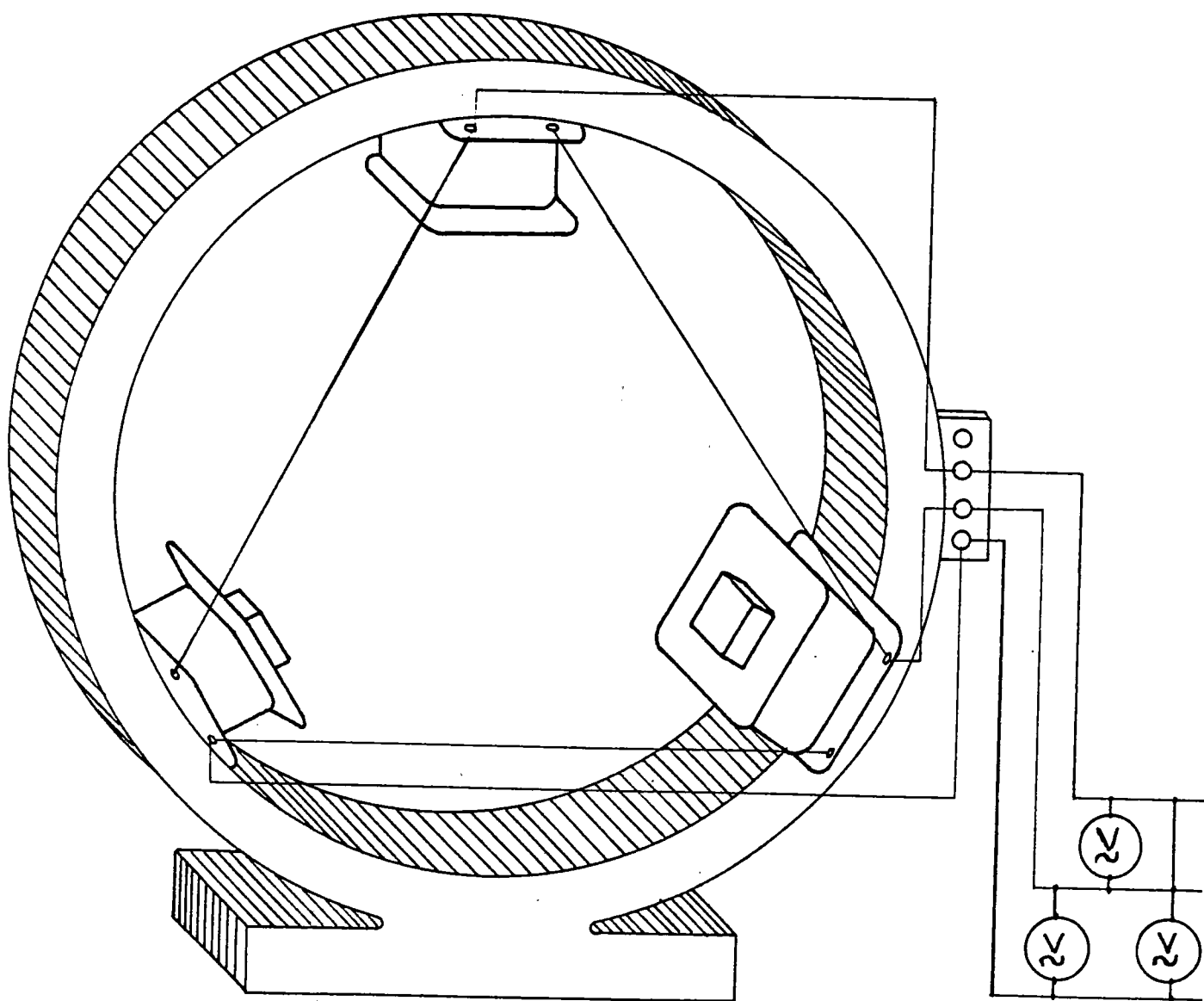


FIGURA 33. Conexión en triángulo

vectorial de fases.

- Qué ventajas y desventajas presenta la conexión trifásica en triángulo?

## 6. BIBLIOGRAFIA

CHESTER L., Dawes. Tratado de electricidad II. Corriente alterna.  
Editorial Gustavo Gili, S.A. pp.130 - 143.

GRAY/WALLACE. Electrotecnia. Editorial Aguilar. pp.346 - 350.

CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DE OCCIDENTE

PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRICA

LABORATORIO DE CONVERSION DE ENERGIA

PRACTICA No. 10

ENSAYO EN VACIO Y EN CORTO DEL ALTERNADOR DIDACTICO

## 1. OBJETIVOS

Obtener las características de vacío y corto del alternador didáctico.

## 2. CONCEPTOS BASICOS

### 2.1 ENSAYO EN VACIO

Este ensayo permite obtener las características de vacío  $E_0$  vs  $I_{ex}$ ; la cual depende de la curva de magnetización del hierro. También se pueden averiguar las pérdidas en vacío, las cuales son aproximadamente iguales a la potencia absorbida por el motor en cada caso menos la potencia consumida por el motor cuando el generador está des-

excitado. En la Figura 34 se observan las conexiones para el ensayo en vacío y en la Figura 35 la curva característica de vacío y corto.

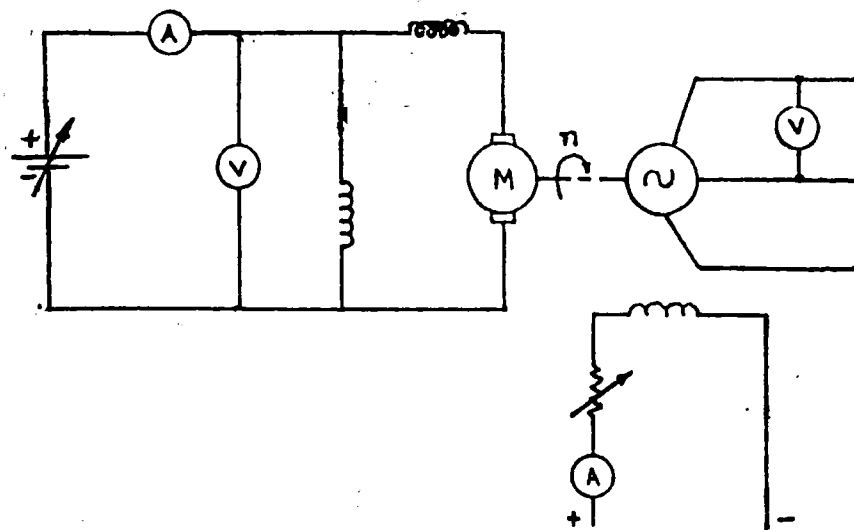


FIGURA 34 . Diagrama de conexiones ensayo en vacío

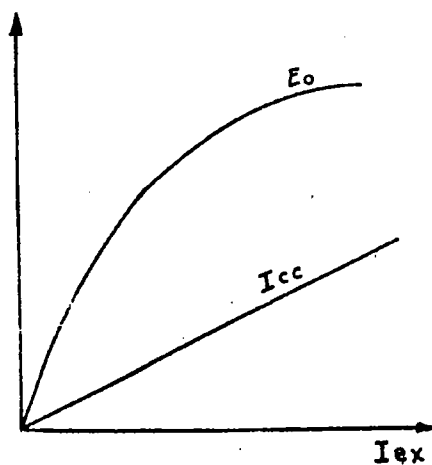


FIGURA 35 . Características de vacío y corto



## 2.2 ENSAYO EN CORTO

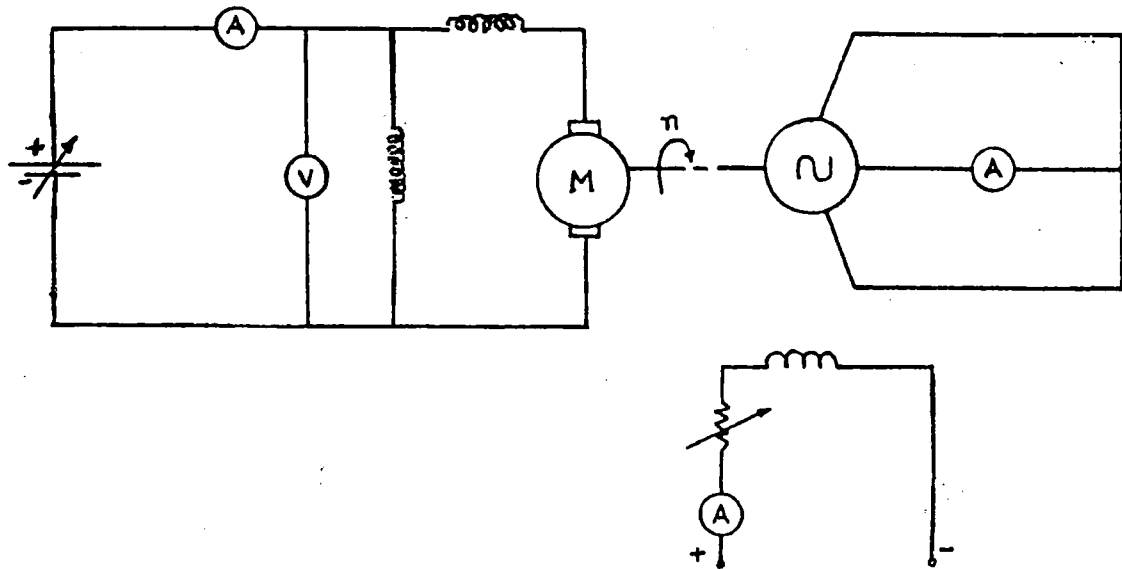


FIGURA 36 . Diagrama de conexiones ensayo en corto

El ensayo en corto permite averiguar la característica en corto ( $I_{cc}$  vs  $I_{ex}$ ). La potencia consumida por el alternador corresponde en este caso a las pérdidas en el cobre, puesto que la tensión generada es muy pequeña y por lo tanto las pérdidas en el hierro son despreciables. Estas pérdidas en el cobre son aproximadamente iguales a la potencia total consumida por el motor en cada caso, menos la potencia que absorbe el motor cuando el alternador está desexcitado. La resistencia de armadura, si las bobinas están conectadas en Y es:

$$R_a = \frac{\text{Perd. cu}}{3 I_{cc}^2}$$

Perd. cu = pérdidas en el cobre totales

Para calcular la impedancia de sincronismo se toman para el mismo valor de la corriente de excitación ( $I_{ex}$ ), la tensión en vacío ( $E_o$ ) y la corriente de corto ( $I_{cc}$ ):

$$Z_s = \frac{E_o}{I_{cc}} ; \text{ para una misma } I_{ex}$$

La impedancia de sincronismo es variable con la corriente de excitación, debido a que en el ensayo en corto no se presenta el efecto de saturación en el núcleo magnético, ya que por efecto de la reacción de inducido el flujo resultante es muy pequeño. La reactancia de sincronismo es:

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_a^2}$$

### 2.3 REACTANCIAS EN EL ALTERNADOR

En él se pueden definir tres tipos de reactancias.

### 2.3.1 Reactancia de dispersión ( $X_d$ )

Es la debida al flujo magnético producido por las bobinas del inducido, pero que no es común al inductor. Este flujo retorna al estator por el aire, también se llama flujo disperso o de fuga.

### 2.3.2 Reactancia de reacción de inducido ( $X_a$ )

Esta reactancia se debe al flujo producido por el inducido y que afecta al campo inductor. El flujo resultante en cualquier punto es la suma fasorial del flujo principal producido por el campo y el flujo de reacción de inducido. Por efecto de esta reactancia se produce en el inducido una caída de tensión igual a:  $jIX_a$

### 2.3.3 Reactancia de sincronismo ( $X_s$ )

Es la suma de las dos anteriores, origina la caída total de voltaje en el inducido, debido a efectos reactivos. Es la reactancia que se va a calcular en este ensayo.

## 2.4 CALCULO DE LA REGULACION

La regulación de tensión se define como la diferencia de tensión en vacío y en carga del alternador expresada como porcentaje de la tensión

de carga.

$$= \frac{E_o - V}{V} \cdot 100\%$$

V = tensión en bornes del alternador bajo carga

La regulación se puede calcular a partir del diagrama fasorial obtenido de los ensayos en vacío y en corto ( Figura 37 )

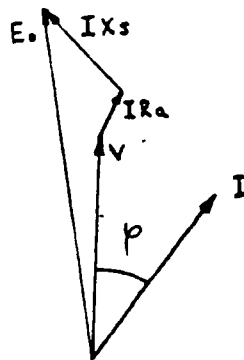


FIGURA 37 . Diagrama fasorial

Este método es aproximado, puesto que el valor de la reactancia de sincronismo  $X_s$  se calculó utilizando el ensayo en corto, en el que no existía saturación, mientras que al voltaje nominal al que se trabaja la máquina siempre hay algo de saturación.

### 3. EQUIPO UTILIZADO

- Un ( 1 ) motor D.C.
- Una ( 1 ) máquina sincrónica trifásica
- Resistencia de arranque del motor D.C.
- Un ( 1 ) reostato de campo del motor
- Un ( 1 ) reostato de campo del alternador
- Un ( 1 ) amperímetro D.C. para la línea del motor
- Un ( 1 ) voltímetro D.C.
- Un ( 1 ) amperímetro D.C. para el campo del alternador
- Un ( 1 ) tacómetro o una lámpara estroboscópica
- Un ( 1 ) voltímetro A.C.

Elementos complementarios ( cables, bananas, etc. )

### 4. PROCEDIMIENTO

- Realizar el diagrama de conexiones para el ensayo en vacío.
- Antes de arrancar el motor verificar que el regulador de la fuente esté al mínimo, es decir  $V = 0$ , una vez arrancado el motor se puede ir aumentando la tensión a medida que se desea aumentar la velocidad. El reostato de campo del alternador se coloca en máxima resistencia y se va quitando a medida que se desea aumentar la corriente de excitación.

Se deben dejar bien aseguradas las conexiones del campo del motor de C.C., pues si en funcionamiento se llegare a desconectar, el motor se embalaría, lo cual se debe evitar.

- Obtener las características de vacío para cuatro frecuencias, una de ellas la nominal. A esta frecuencia nominal se deben leer además el voltaje y la corriente de la máquina motriz, para las otras tres frecuencias no es necesario tomar esas dos lecturas sino solamente: velocidad ( constante en cada ensayo ), corriente de excitación del alternador, tensión de vacío, indicar los datos en la tabla para ensayo en vacío.

- Realizar el ensayo en corto circuito a velocidad nominal, tomar lecturas de corriente del motor, tensión del motor, velocidad ( constante ) corriente de excitación del alternador, corriente de línea del alternador, indicar los datos en la tabla para ensayo en corto.

- Observar la influencia de la velocidad sobre la magnitud de la corriente de corto.

## 5. INFORME

- Dibujar las gráficas resultantes de los ensayos.

- Calcular las pérdidas en el hierro y graficarlas VS .  $E_0$ .

- Calcular las pérdidas en el cobre.
- Graficar tensión " $v_s$ " velocidad para corriente de excitación constante.
- Calcular en cada caso la resistencia de armadura, la impedancia de sincronismo y la reactancia sincrónica. Graficar la impedancia de sincronismo " $v_s$ "  $I_{ex}$ .

## 6. BIBLIOGRAFIA

DAWES, Chester L. Tratado de electricidad II. Corriente Alterna.  
Editorial Gustavo Gili, S. A. pp.130 - 143.

GRAY/WALLACE. Electrotecnia. Editorial Aguilar. pp.346 - 350.





